



Universidad  
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

## TRABAJO FIN DE GRADO

***IMPLEMENTACIÓN DE PINZA ROBÓTICA LOW-COST  
PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS PEQUEÑOS***

**AUTOR:**

**Emilio Aguilera Núñez**

**TUTOR:**

**Edwin Daniel Oña Simbaña**

**Septiembre 2016**



# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar darle gracias a mi familia, por el apoyo, el ánimo y la ayuda que me han prestado siempre, son mi principal apoyo.

A mis compañeros y amigos, que han estado ahí cuando se les necesitaba y me han ayudado, animado y soportado, por lo que se han convertido en un apoyo enorme.

Y por último pero no menos importante, las principales personas que me han ayudado en este proyecto, mi tutor Edwin, que ha sacado tiempo para ayudarme y me ha motivado en los momentos que necesitaba con su atención e interés durante la elaboración de este trabajo y al que deseo muchísima suerte tanto en el proyecto en el que está inmerso actualmente como en sus futuros proyectos, y a Jorge Cruz el cual me ha ayudado y enseñado mucho durante la duración del proyecto, gracias a ellos ha sido posible la realización de este trabajo.



# RESUMEN

El siguiente trabajo forma parte de un proyecto mayor llamado RoboHealth, cuyo objetivo es desarrollar robótica asistencial y de rehabilitación y al cual este trabajo intenta aportar un efector final low-cost, capaz de manipular satisfactoriamente objetos pequeños, para uno de los Robots asistenciales de los que ya se disponen.

Para realizar esta tarea se comenzará especificando el tipo de transmisión de movimiento a utilizar por la pinza, gracias al programa Working Model, el cual dispone de la capacidad de importar archivos .dxf, ensamblarlos y simular el movimiento de la pinza de una forma sencilla.

Una vez escogido el tipo de transmisión, se diseñará un primer prototipo y se imprimirá gracias a la tecnología de impresión 3D, una vez impreso y ensamblado se verificará su funcionalidad y se estudiará la necesidad de una segunda iteración.

Debido al tamaño del primer prototipo se diseñarán las piezas de una segunda pinza que cumpla el tamaño requerido y, una vez ensamblada la pinza se verificará tanto su funcionalidad como su tamaño.

Por último se explicará el funcionamiento del circuito de control de la pinza utilizado tanto para el primer como para el segundo prototipo.

# ABSTRACT

The following Project forms part of a larger Project called RoboHealth, Whose aim is to develop assistance and rehabilitation robotics. This final Project attempts to a final low-cost effector, for one of the assistant robots that already have, capable of successfully manipulating small objects.

To perform this task will begin by specifying the type of movement transmission to be used by the gripper thanks to Working Model, this program has the capacity to import .dxf files, assemble them and to easily simulate the movement of the gripper.

Once the type of transmission is chosen, a first prototype will be designed and printed using 3D printing technology, once printed and assembled, its functionality will be verified, and the need for a second iteration will be studied.

Due to the size of the first prototype, the pieces for a second gripper, that satisfy the desired size, will be designed. Once the gripper is assembled, both its functionality and size will be verified.

Finally, the functionality of the gripper's control circuit will be explained by using both the first and second prototype.

## Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN .....	V
ABSTRACT.....	VI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Motivación.....	2
1.1.1. Robot Amor .....	3
1.1.2. Robot ASIBOT .....	4
1.2. Estado del arte .....	8
1.2.1. Pinzas no comerciales.....	8
1.2.1.a. LISA Hand .....	8
1.2.1.b. Osaka City University Hand I .....	9
1.2.1.c. NAIST-Hand.....	10
1.2.1.d. Pinza de 3 dedos reconfigurable .....	11
1.2.1.e. Pinza de 3 dedos low-cost .....	12
1.2.1.f. Yale OpenHand Project .....	13
1.2.2. Pinzas comerciales .....	15
1.2.2.a. Shadow Dexterous Hand .....	15
1.2.2.b. Shadow Lite.....	16
1.2.2.c. SVH Hand.....	16
1.2.2.d. Barret Hand .....	17
1.2.2.e. Robotiq 3-Finger Gripper.....	17
1.2.2.f. Robotiq 2-Finger Gripper .....	18
1.2.3. SoftRobotics .....	19
1.2.3.a. Soft pneumatic gripper.....	19
1.3. Objetivos .....	20
1.4. Material y Métodos .....	21
1.4.1. Working Model .....	21
1.4.2. Autodesk Autocad .....	21
1.4.3. Autodesk Inventor.....	22
1.4.4. Repetier-Host.....	22
1.4.5. Arduino IDE .....	22
2. DESARROLLO .....	23
2.1. Diseño y simulación .....	24

---

2.1.1.	Diseños en Autocad:.....	25
2.1.2.	Simulaciones.....	26
2.1.2.a.	Pinza 1: Tendones.....	26
2.1.2.b.	Pinza 2: Pasador-Ranura.....	27
2.1.2.c.	Pinza 3: Tornillo sin fin.....	28
2.2.	Primer Prototipado.....	29
2.2.1.	Diseño (primer prototipo).....	32
2.2.2.	Impresión (primer prototipo).....	35
3.	IMPLEMENTACIÓN FINAL.....	39
3.1.	Segundo Prototipo.....	40
3.1.1.	Diseño (segundo prototipo).....	43
3.1.2.	Impresión (segundo prototipo).....	45
3.2.	Piezas de anclaje.....	48
3.2.1.	Diseño.....	48
3.2.2.	Impresión.....	49
3.3.	Sistema de seguridad.....	50
3.3.1.	Diseño.....	50
3.3.2.	Impresión.....	52
3.4.	Control.....	54
3.4.1.	Circuito.....	54
4.	PRESUPUESTO.....	56
4.1.	Primer prototipo.....	57
4.2.	Segundo prototipo.....	58
4.3.	Control.....	58
4.4.	Personal.....	59
5.	CONCLUSIÓN.....	60
5.1.	Análisis de resultados.....	61
5.2.	Trabajos futuros.....	62
6.	REFERENCIAS.....	63
7.	ANEXO I (Código Arduino).....	67
8.	ANEXO I (Planos).....	70



## Índice de Figuras

Figura 1: Robot Amor [2] .....	3
Figura 2: Pinza robot Amor [2].....	4
Figura 3: Robot Amor en el laboratorio.....	4
Figura 4: Robot Asibot [3] .....	4
Figura 5: Pinza retráctil Asibot [3].....	5
Figura 6: Robot Asibot y Docking Stations [3] .....	5
Figura 7: Conectores Asibot .....	6
Figura 8: Portaherramientas .....	7
Figura 9: Cono de conexión Asibot.....	7
Figura 10: Pinza comercial Fetch (empresa Lacquey) .....	7
Figura 11: LISA Hand [4].....	8
Figura 12: Sistema de transmisión mecánico para LISA Hand [4].....	8
Figura 13: Osaka City University Hand I [5].....	9
Figura 14: Modos de agarre Osaka City University Hand I [5].....	9
Figura 15: NAISt-Hand [6].....	10
Figura 16: Dedo de la NAISt-Hand [6] .....	10
Figura 17: Pinza de 3 dedos reconfigurable [7] .....	11
Figura 18: Agarres de Manipulador de 3 dedos reconfigurable [7] .....	11
Figura 19: Pinza de 3 dedos low-cost con impresión 3D [8] .....	12
Figura 20: Agarres de pinza de 3 dedos low-cost con impresión 3D [8].....	12
Figura 21: Yale openhand modelo T [9].....	13
Figura 22: Yale openhand modelo T42 [10] .....	13
Figura 23: Yale openhand modelo O [11] .....	14
Figura 24: Tendones modelo M2 [12] .....	14
Figura 25: Yale openhand modelo M2 [12].....	14
Figura 26: Shadow dexterous hand [13].....	15
Figura 27: Shadow Lite [14].....	16
Figura 28: SVH Hand [15] .....	16
Figura 29: Barret Hand [16].....	17
Figura 30: Robotiq 3-Finger gripper [17] .....	17
Figura 31: Robotiq 2-Finger gripper [18] .....	18
Figura 32: Soft pneumatic gripper [20].....	19
Figura 33: Base Pinza (Working Model).....	25
Figura 34: Lado Pinza (Working Model).....	25
Figura 35: Pieza final Pinza (Working Model).....	25
Figura 36: Lado extra Pinza (Working Model) .....	25
Figura 37: Pinza de tendones abierta .....	26
Figura 38: Pinza de tendones cerrada .....	26
Figura 39: Pinza Pasador-ranura abierta.....	27
Figura 40: Pinza Pasador-ranura cerrada.....	27
Figura 41: Pinza tornillo sin fin abierta .....	28
Figura 42: Pinza tornillo sin fin cerrada .....	28
Figura 43: Cálculos para longitud de lado .....	29
Figura 44: Cálculos fuerza (1) .....	30

Figura 45: Modelo Pieza Lado (1).....	32
Figura 46: Modelo Pieza Lado-engranaje (1).....	32
Figura 47: Cálculos ranuras (1) .....	32
Figura 48: Modelo Pieza Pinza (1).....	33
Figura 49: Modelo Pieza Base (1).....	34
Figura 50: Modelo Motor.....	34
Figura 51: Modelo primer prototipo .....	34
Figura 52: Pieza Lado (1) .....	35
Figura 53: Pieza Lado-engranaje (1).....	36
Figura 54: Pieza Pinza (1) .....	36
Figura 55: Pieza Base (1) .....	37
Figura 56: tornillo sin fin .....	37
Figura 57: Motor .....	37
Figura 58: Primer prototipo.....	38
Figura 59: Cálculos fuerza (2) .....	41
Figura 60: Modelo Pieza Lado (2).....	43
Figura 61: Modelo Pieza Lado-engranaje (2).....	43
Figura 62: Modelo Pieza Pinza (2).....	44
Figura 63: Modelo Pieza Base (2).....	44
Figura 64: Modelo segundo prototipo.....	44
Figura 65: Pieza Lado (2) .....	45
Figura 66: Pieza Lado-engranaje (2).....	46
Figura 67: Pieza Pinza (2) .....	46
Figura 68: Pieza Base (2) .....	47
Figura 69: Modelo Pieza Sujetamotor .....	48
Figura 70: Modelo Pieza Sujetapinza .....	48
Figura 71: Pieza Sujetapinza .....	49
Figura 72: Pieza Sujetamotor .....	49
Figura 73: Modelo Pieza Engranaje-Imán .....	50
Figura 74: Modelo Pieza Lado-Imán.....	50
Figura 75: Modelo Imán.....	50
Figura 76: Modelo Pinza Final (a).....	51
Figura 77: Modelo Pinza Final (b).....	51
Figura 78: Pieza Lado-Imán .....	52
Figura 79: Pieza Engranaje-Imán.....	52
Figura 80: Pinza Final abierta .....	52
Figura 81: Pinza Final.....	52
Figura 82: Pinza acoplada en Asibot.....	53
Figura 83: Conexiones de Pololu A4988 .....	55
Figura 84: Esquema circuito prototipado .....	55

## Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades robot Amor [2] .....	3
Tabla 2: Resumen manos comerciales .....	18
Tabla 3: Comparación Softrobotics .....	19
Tabla 4: Cálculos para longitud de lado (primer prototipo).....	29
Tabla 5: Datos para Fuerza.....	30
Tabla 6: Impresión primer prototipo.....	35
Tabla 7: Cálculos longitud de lado (segundo prototipo).....	40
Tabla 8: Datos para Fuerza (2).....	41
Tabla 9: Impresión segundo prototipo .....	45
Tabla 10: Impresión piezas de anclaje.....	49
Tabla 11: Impresión Piezas de Seguridad .....	52
Tabla 12: Datos para cálculo de precios .....	57
Tabla 13: Presupuesto de piezas de primer prototipo .....	57
Tabla 14: Presupuesto piezas Implementación final.....	58
Tabla 15: Presupuesto Control .....	58
Tabla 16: Coste de personal .....	59

# 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

El desarrollo de este trabajo de fin de grado se encuentra dentro del proyecto Robohealth, cuyo principal objetivo es desarrollar robótica de asistencia y rehabilitación. Los pacientes a los que se quiere ayudar con este proyecto son personas con limitaciones físicas, habilidades cognitivas reducidas y enfermedades crónicas, las cuales representan aproximadamente el 10 % de la población de la Unión Europea, presentando una alta dependencia de la familia. La aplicación de la robótica puede ayudar a estas personas a obtener una mejor calidad de vida dándoles una mayor independencia.

Dentro de Robohealth hay 4 objetivos principales:

1. Desarrollo de robots asistentes con forma humanoide que pueden aumentar las habilidades físicas y cognitivas de los pacientes en las tareas diarias: comer, beber, higiene personal y transporte, los robots tendrán capacidades de locomoción bípeda y manipulación de objetos, los cuales requieren un control de la postura de todo el cuerpo.
2. Desarrollo de exoesqueleto robótico de la parte superior del cuerpo (hombro-brazo-mano) para la rehabilitación de pacientes en entornos hospitalarios; el principal objetivo es el uso de sistemas “low- cost” con nuevas interfaces (sensores de presión, de seguimiento ocular y tacto).
3. Desarrollo de nuevos actuadores y nano-materiales con sensores flexibles integrados, así como el uso de materiales compuestos para la fabricación de robots más ligeros, seguros y robustos.
4. Creación de entornos inteligentes para pacientes que conviven con robots en hospitales usando un nuevo paradigma de interacción multimodal.

Por último, estas tecnologías serán evaluadas en entornos relacionados con la salud y pacientes reales, para lo cual se desarrollarán protocolos experimentales adecuados y métricas de evaluación [1].

Entre los puntos anteriores, este trabajo forma parte más específicamente del primer objetivo, por lo que a continuación se hablará de este más detalladamente.

Para abordar los anteriores objetivos, se dispone de las instalaciones del RoboticsLab y del laboratorio del Parque Científico UC3M, que cuenta con un robot humanoide de tamaño real y dos brazos robóticos, uno diseñado en el laboratorio y otro comercial.

#### 1.1.1. Robot Amor



*Figura 1: Robot Amor [2]*

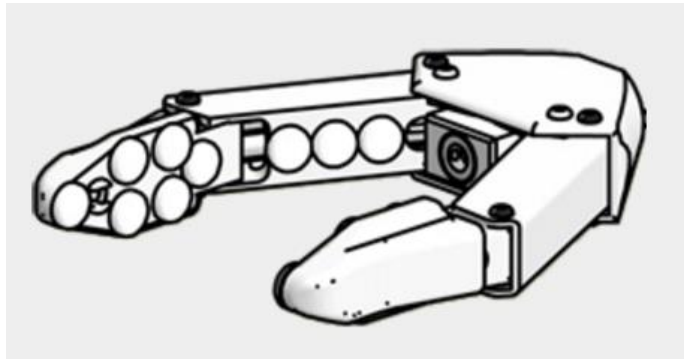
Este es un robot es comercial y cuenta con las siguientes características:

Grados de Libertad	7
Carga útil	2.5 Kg
Alcance	95 cm
Peso	9 Kg
Consumición de energía	24V DC , 5 A

*Tabla 1: Propiedades robot Amor [2]*

Este robot también cuenta en este momento con sensores de proximidad dispuestos a lo largo de su estructura.

El actuador final con el que cuenta este brazo robot es una pinza de 2 dedos con una fuerza de 35 N y una apertura máxima de 90 mm, además esta pinza cuenta con una cámara web RGB tal y como se muestra en la figura 2.



*Figura 2: Pinza robot Amor [2]*



*Figura 3: Robot Amor en el laboratorio*

### **1.1.2. Robot ASIBOT**



*Figura 4: Robot Asibot [3]*



Este es un robot asistencial cuyo diseño y desarrollo se describe en la Tesis Doctoral “Metodología de diseño de robots asistenciales. Aplicación al robot portátil ASIBOT” de Alberto Jardón Huete.

En el momento de su desarrollo contaba con una pinza de 3 dedos (siendo uno de ellos de 2 articulaciones y que hacía de pulgar opuesto a los otros dos dedos de 3 articulaciones) accionada con un solo actuador, a través de tendones y poleas, lo que posibilitaba que la pinza se adapte a los objetos independientemente de su forma asegurando un agarre firme. Aunque lo más importante es que esta pinza era retráctil, lo que posibilitaba que en el momento en que la pinza no fuera usada, los dedos se metieran dentro del cono de conexión y que con esto fuera posible la conexión a las “docking stations” y el agarre de otras herramientas [3].

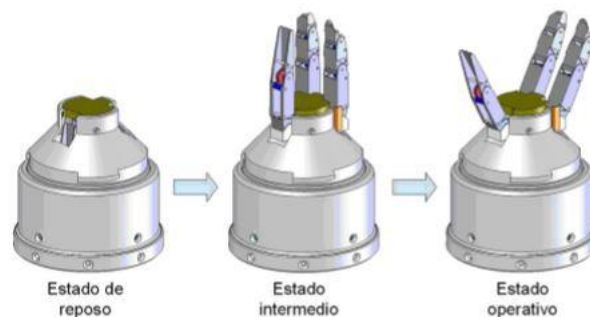


Figura 5: Pinza retráctil Asibot [3]

La principal característica de este robot asistencial es su capacidad de desplazamiento gracias a estas “docking stations” y la igualdad de sus conectores con forma de cono (esta forma de conos es un sistema autocentrante que facilita la conexión incluso en caso de pequeños errores de posicionamiento).



(a)



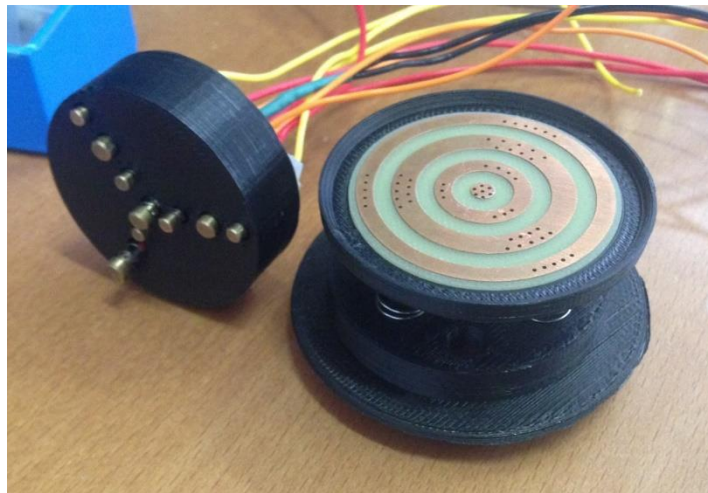
(b)

Figura 6: Robot Asibot y Docking Stations [3]

a) Trasvase desde silla de ruedas a mesa, y b) Trasvase entre docking stations



Actualmente se están realizando cambios en el robot ASIBOT. Concretamente se están cambiando las conexiones en los extremos del robot ya que debido al peso había una inclinación en estos que ocasionaba que el robot se desconectara, por este motivo, en este momento se tiene el diseño de conectores de la figura 7 los cuales además de disponer de pistas circulares concéntricas para posibilitar la conexión con cualquier ángulo, dispone de muelles tanto en la base de estas pistas circulares como en los pines de conexión para absorber las inclinaciones anteriormente mencionadas, aunque como aún se está trabajando en ellos están sujetos a cambios .



(a)



(b)

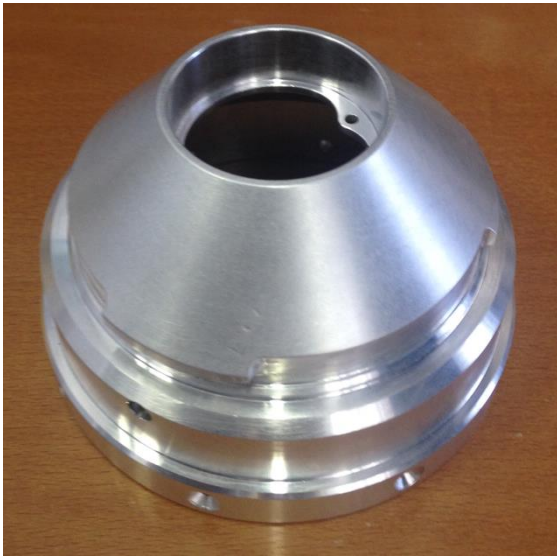


(c)

Figura 7: Conectores Asibot

a) Conjunto de conectores b) Conector de cono macho c) Conector de cono hembra

También se han realizado cambios en el diseño de los conos de conexión, los cuales se han acortado, dado que se ha prescindido de la pinza retráctil, quedando los conos y el portaherramientas de la siguiente forma.



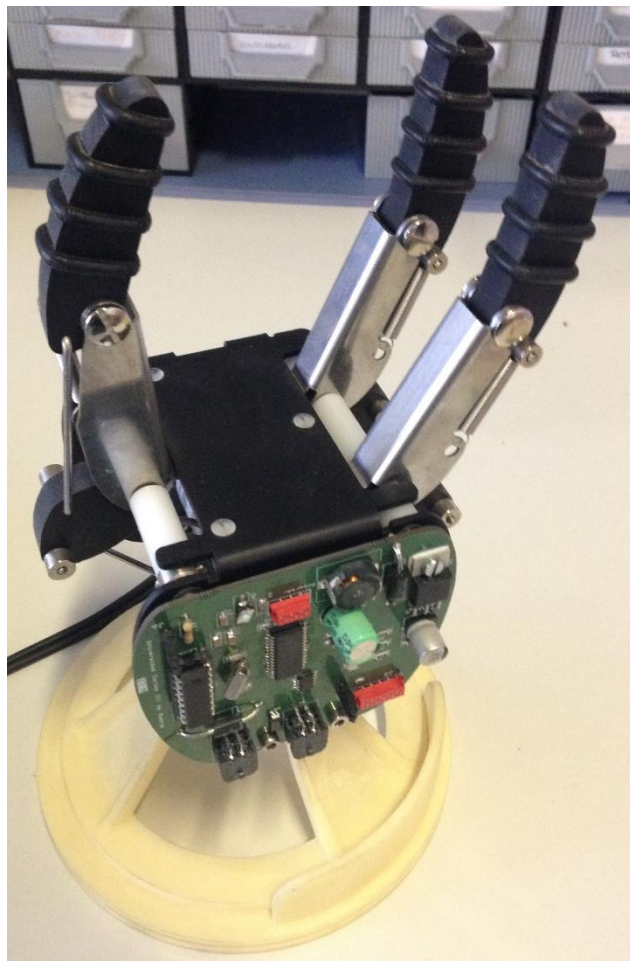
*Figura 9: Cono de conexión Asibot*



*Figura 8: Portaherramientas*

Dado que se prescindió de la pinza retráctil fue necesario sustituirla por otra, la pinza que fue escogida es comercial y cuenta con tres dedos activados con un solo actuador, siendo uno de ellos opuesto a los otros dos. Debido a esta disposición de los dedos esta herramienta es incapaz de coger con seguridad objetos pequeños, como son algunos de los objetos utilizados en ejercicios de rehabilitación física.

Por este problema, para realizar un agarre seguro con el robot Asibot, de estos objetos pequeños, se decidió diseñar una pinza que posibilitara este agarre. La manipulación de este tipo de objetos si es posible con el robot AMOR gracias a su pinza de 2 dedos.



*Figura 10: Pinza comercial Fetch (empresa Lacquey)*

## 1.2. Estado del arte

Teniendo ya una necesidad que satisfacer se procedió a investigar las opciones de herramientas disponibles, incluyendo en la búsqueda diversas tecnologías, tanto en efectores finales diseñados para proyectos personales como comerciales, además de valorar los distintos tipos de agarre.

### 1.2.1. Pinzas no comerciales

#### 1.2.1.a. LISA Hand



Figura 11: LISA Hand [4]

Esta mano robótica humanoide cuenta con 14 grados de libertad y 5 dedos subactuados, siendo estos activados por un motor cada uno [4], lo destacable de esta mano robótica es la novedosa forma de adaptarse a la forma de los objetos, ya que sus dedos cuentan con placas que, al ser presionadas por el objeto que se va a agarrar, empujan la siguiente falange hacia este objeto y así sucesivamente hasta haberse cerrado la mano completamente, lo cual proporciona una gran ventaja al posibilitar un agarre seguro con menos actuadores.

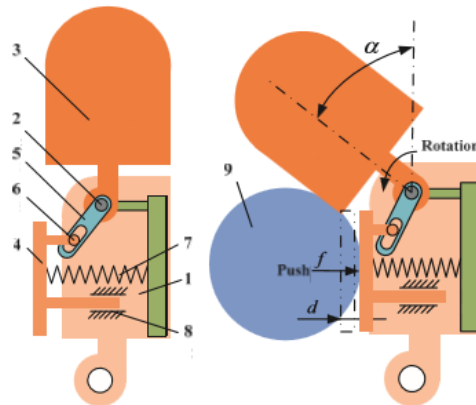
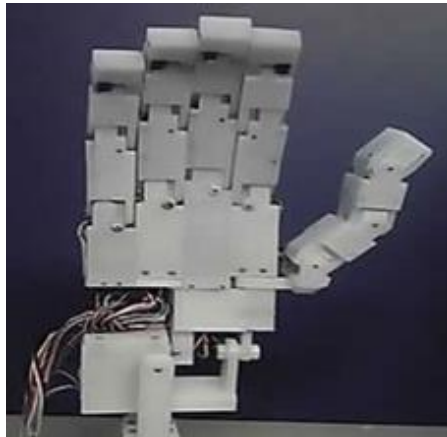


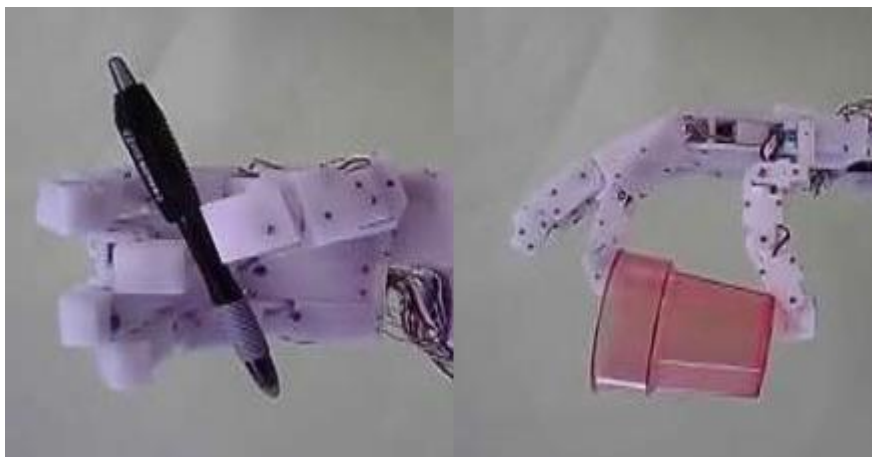
Figura 12: Sistema de transmisión mecánico para LISA Hand [4]

#### 1.2.1.b. Osaka City University Hand I



*Figura 13: Osaka City University Hand I [5]*

Esta mano robótica antropomórfica dispone de 22 grados de libertad en total, estando 3 de ellos en la muñeca y los otros 19 en sus 5 dedos siendo el movimiento de estos totalmente independiente de los demás [5], por ultimo esta mano cuenta con un pulgar oponible cuya posición se puede configurar para realizar el agarre que mejor convenga, aunque esta mano tiene la ventaja de ser polivalente cuenta con la desventaja de la dificultad de control.



*Figura 14: Modos de agarre Osaka City University Hand I [5]*

#### 1.2.1.c. NAIST-Hand



Figura 15: NAIST-Hand [6]

Esta mano robótica cuenta 12 grados de libertad en total, 3 DOF en cada uno de sus 4 dedos, y a su vez estos cuentan con 3 motores cada uno [6] esta cantidad de motores aumenta considerablemente su peso lo que limita las tareas para las que puede ser utilizada esta mano.

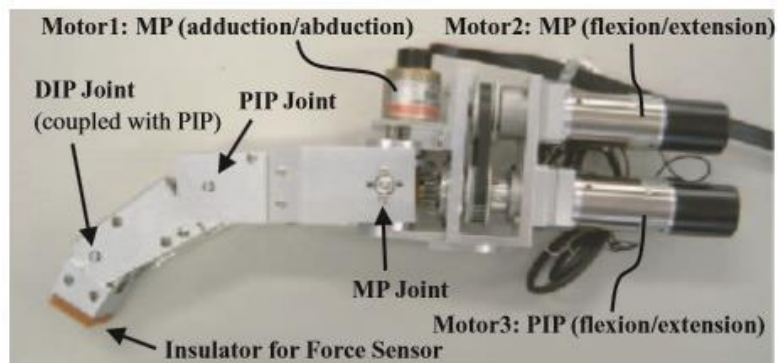


Figura 16: Dedo de la NAIST-Hand [6]

Además cuenta con un método para medir las fuerzas de agarre basado en la visión, lo cual aporta múltiples ventajas tales como: alta precisión en la medición del área de contacto, la estimación directa de margen de deslizamiento sin conocer el coeficiente de fricción etc.

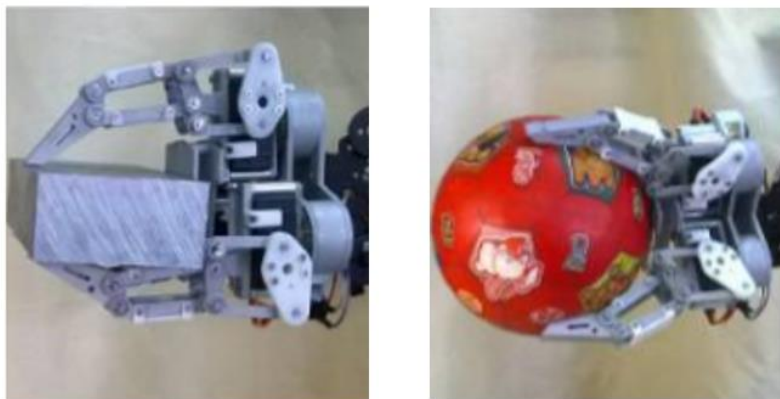


#### 1.2.1.d. Manipulador de 3 dedos reconfigurable



*Figura 17: Pinza de 3 dedos reconfigurable [7]*

Esta es una pinza con estructura metálica de 3 dedos reconfigurables y fácil de controlar, cuenta con dos motores por dedo (un servomotor y un motor DC, el cual transmite su movimiento a un sistema de tornillo sin fin) con sus respectivos potenciómetros para saber en qué posición se hallan los dedos [7]. Todo esto posibilita diferentes tipos de agarre para garantizar poder coger una gran cantidad de objetos con diferente forma, lo cual hace de esta pinza una buena opción para tareas que necesiten agarrar varios tipos de objetos.

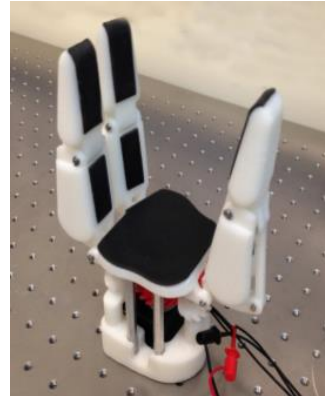


*Figura 18: Agarres de Manipulador de 3 dedos reconfigurable [7]*

#### 1.2.1.e. Pinza de 3 dedos low-cost



(a): configuración 120°



(b): Configuración dedos opuestos

Figura 19: Pinza de 3 dedos low-cost con impresión 3D [8]

Esta pinza robótica está hecha con tecnología de impresión 3D lo cual, como indica su nombre, posibilita que esta pinza sea low-cost. Cuenta con 3 dedos subactuados movidos todos por un solo motor mediante un sistema de tornillo sin fin-engranajes además esta pinza tiene la posibilidad de adoptar dos configuraciones (aunque el cambio es manual), una de ellas tiene los dedos dispuestos a 120 grados (figura 19-a) mientras que la otra tiene posicionado 1 dedo opuesto a los otros dos (figura 19-b) [8].



Figura 20: Agarres de pinza de 3 dedos low-cost con impresión 3D [8]

#### 1.2.1.f. Yale OpenHand Project

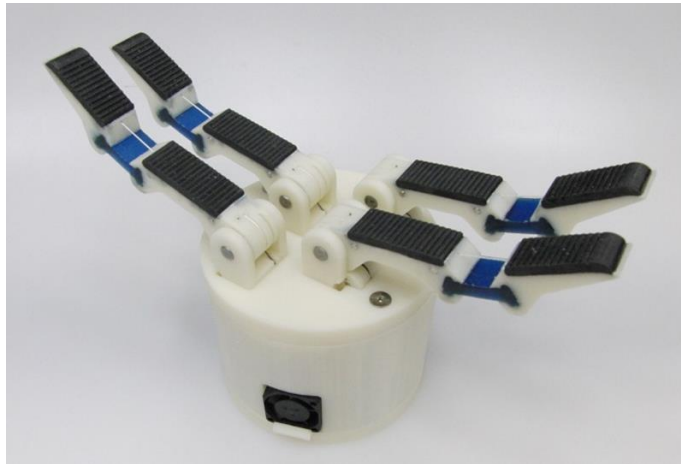
Este proyecto tiene 4 modelos de pinzas robóticas subactuadas cuya principal ventaja es que cada una de ellas tiene publicados todos los archivos CAD de sus piezas, estas pinzas tienen la característica común de funcionar gracias a tendones, además se da la posibilidad de que las uniones entre falanges sean uniones de resina o, en su defecto, uniones mecánicas.

Debido a que las pinzas de este proyecto son muy similares, se ha decidido incluirlas en un mismo apartado.

A continuación se dará una breve descripción de cada una de estas pinzas.

##### Modelo T:

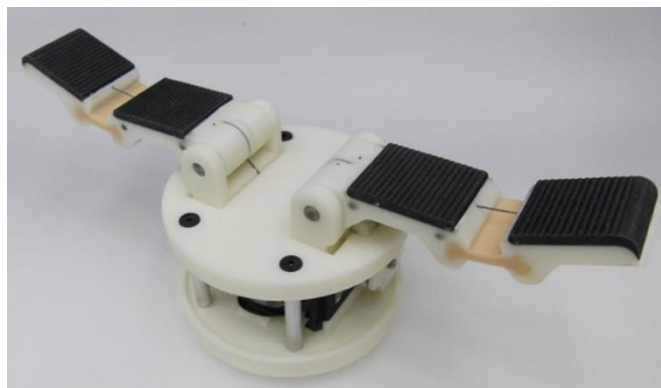
Esta pinza cuenta con un motor y 4 dedos, los cuales se disponen de forma que 2 de ellos están enfrentados a los otros 2 dedos [9].



*Figura 21: Yale openhand modelo T [9]*

##### Modelo T42:

El modelo T42 cuenta con 2 motores los cuales actúan sobre 1 dedo cada uno, que además son más anchos que los de la pinza anterior [10].



*Figura 22: Yale openhand modelo T42 [10]*



### Modelo O:

Este modelo cuenta con 4 motores actuando 1 motor sobre cada uno de los 3 dedos mientras el otro se encarga de configurar la orientación de estos para adaptarse a distintos tipos de agarre [11].

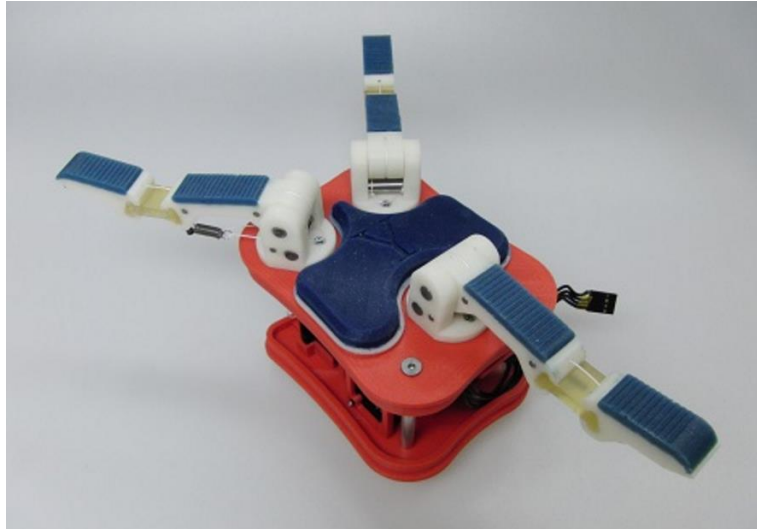


Figura 23: Yale openhand modelo O [11]

### Modelo M2:

Esta pinza esta actuada por 2 dedos y 2 motores, ambos actúan sobre el mismo dedo de forma, mientras el otro dedo es fijo, este se puede mover de forma que la falange final se adapte a la forma del objeto o el dedo se mueva totalmente recto, de esta forma dispone de dos tipos de agarre que puede alternar según venga mejor para el objeto a agarrar [12].

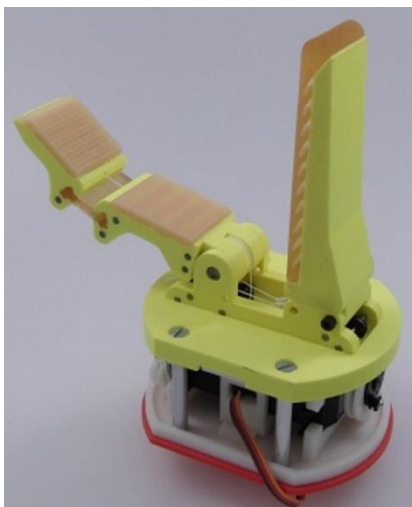


Figura 25: Yale openhand modelo M2 [12]

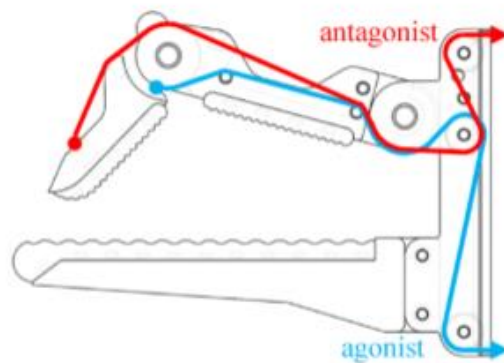


Figura 24: Tendones modelo M2 [12]

### 1.2.2. Pinzas comerciales

#### 1.2.2.a. Shadow Dexterous Hand

Esta mano es un avanzado sistema robótico que cuenta con 20 grados de libertad para reproducir lo mejor posible los movimientos de la mano humana además de proveer la fuerza de agarre y la precisión de movimiento de esta.

Este modelo funciona gracias a tendones que posibilitan el movimiento de cada una de las falanges y proporcionan a la mano una carga útil de 4 Kg, aunque cuenta además con dos variantes que se diferencian en los actuadores que utilizan, mientras que uno se activa mediante motores, la otra variante funciona gracias válvulas de aire que actúan como los músculos humanos contrayéndose y tirando de los tendones, en ambos casos cuenta con 20 actuadores, estos causan que este modelo cuente con una gran dificultad de control.

Aunque todas estas características hacen de esta mano una muy buena elección, también tiene algunas características que hacen que esta mano pueda no ser la mejor elección en algunas ocasiones, tales como su peso, ya que en su conjunto cuenta con un peso de 4,2 Kg lo que disminuye considerablemente la carga útil del conjunto del robot con el que se trabajara.

Además cuenta con un precio de 103829 € lo cual significa un gran problema también para su elección en proyectos sin grandes presupuestos [13].



*Figura 26: Shadow dexterous hand [13]*

#### 1.2.2.b. Shadow Lite

Esta mano es una versión más pequeña y asequible del modelo anterior, por lo que cuenta con 13 grados de libertad y una carga útil de 4 Kg, también intenta asemejar el movimiento de la mano humana, aunque a diferencia de la Shadow Dexterous Hand carece de dedo meñique y muñeca, además de contar solo con un modelo cuyos actuadores son 13 motores, esto causa una dificultad de control moderada aunque menor que el modelo anterior.

Otra de sus desventajas es su peso, que siendo de 2,4 Kg, aunque moderado, sigue disminuyendo seriamente la carga útil del conjunto de trabajo.

Por último su precio es de 60740 € lo cual una vez más dificulta su elección para cierto tipo de proyectos [14].



Figura 27: Shadow Lite [14]

#### 1.2.2.c. SVH Hand

Esta mano de 5 dedos dispone de 20 grados de libertad actuados por 9 motores y pretende, al igual que los modelos anteriores, parecerse lo máximo posible a una mano humana, tanto en la forma como en el movimiento.

Cuenta con un peso de 1,3 Kg y un precio de 47193 € las cuales son características aceptables teniendo en cuenta las capacidades y comparándola con los modelos anteriores, aunque siguen siendo dos características delimitantes en cuanto a la elección de esta herramienta [15].



Figura 28: SVH Hand [15]

#### 1.2.2.d. Barret Hand

Esta pinza cuenta con 8 grados de libertad y tres dedos actuados por 4 motores, los cuales actúan sobre un dedo cada uno mientras que el otro configura la posición de los 2 dedos de los extremos, estos pueden posicionarse desde la misma posición del dedo central (que es fijo) hasta totalmente opuestos a este, esta característica otorga a esta pinza con una gran polivalencia con un baja dificultad de control.

Dispone de un peso de 1,2 Kg lo cual es un valor bastante alto teniendo en cuenta las capacidades respecto al modelo anterior.

Este modelo cuenta con un precio de 28642 € lo cual lo hace asequible para un mayor número de proyectos [16].



(a): Posible configuración 1



Figura 29: Barret Hand [16]

(b): Posible configuración 2

#### 1.2.2.e. Robotiq 3-Finger Gripper

Este robot dispone de 3 dedos de los cuales 2 de ellos se sitúan enfrente del otro, además estos dedos disponen de la posibilidad de inclinarse tanto para juntarse entre ellos como para separarse, de esta forma pueden adaptarse según el objeto que se quiera agarrar de esta forma su carga útil puede ser de hasta 10 Kg.

Teniendo en cuenta que pesa 2,3 Kg y su precio es de 15800 € es una buena opción para tareas que requieran levantar grandes cargas [17].



Figura 30: Robotiq 3-Finger gripper [17]

### 1.2.2.f. Robotiq 2-Finger Gripper

Esta pinza dispone de 2 dedos los cuales tienen la posibilidad de realizar un agarre adaptativo al ser estos subactuados.

Dispone de una carga útil de 5 Kg, un peso de 850 gramos y un precio de 4250 €, estas características son menos limitantes en comparación con modelos anteriores aunque cuenta con la desventaja de ser menos polivalente [18].



Figura 31: Robotiq 2-Finger gripper [18]







Nombre	Nº Dedos	Peso	Carga util	Precio	Nº actuadores	Grados de libertad	Foto
Shadow Dexterous Hand	5	4,2 Kg	4 Kg	103 829 €	20	20	
Shadow Lite Hand	4	2,4 Kg	4 Kg	60 740 €	13	13	
SVH Hand	5	1,3 Kg	?	47 193 €	9	20	
Barret Hand	3	1,2 Kg	6 Kg	28 642 €	4	8	
Robotiq 3-Finger	3	2,3 Kg	2,5-10 Kg	15 800 €	?	?	
Robotiq 2-Finger	2	0,85 Kg	5 Kg	4 250 €	?	?	

Tabla 2: Resumen manos comerciales

### 1.2.3. SoftRobotics

Este tipo de robótica se caracteriza por el uso de materiales flexibles.

Otras características son el menor coste, la activación neumática (mayoritariamente), y la ligereza debido al tipo de material que se utiliza.

Debido a estas características, actualmente este tipo de robótica está en auge y es usada para operaciones con humanos ya que hace las interacciones más seguras [19].

#### 1.2.3.a. Soft pneumatic gripper

Esta pinza dispone de 4 dedos de 100 mm de longitud, aunque dispone de la posibilidad de regular la longitud efectiva (desde 30 mm hasta los 100 totales), los cuales funcionan gracias a aire comprimido que, debido a su forma, hace que estos se flexionen hacia dentro realizando el agarre.

Además la fuerza que ejerce sobre el objeto a recoger depende tanto de la presión que se le proporcione a la pinza como de la forma del objeto que se quiere agarrar, teniendo una fuerza máxima de agarre de 13,5 N según los experimentos realizados [20].

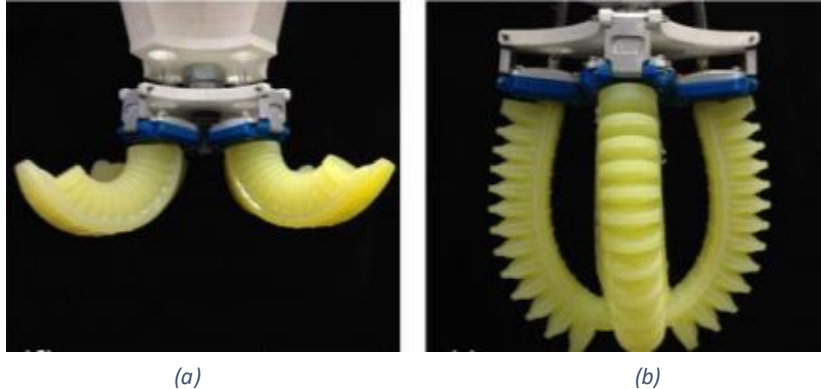


Figura 32: Soft pneumatic gripper [20]

(a): Pinza abierta (b): Pinza cerrada

Nombre	Material	Peso	Precio	Actuadores	Seguridad
Pinzas con Materiales Rígidos	Material Rígido	Pesado en su mayoría	Más caras	Motores en su mayoría	Sistemas de seguridad mediante sensores
SoftRobotics	Material deformable (siliconas)	Ligero debido a los materiales	Materiales más baratos	Accionados por aire comprimido	Menor peligro de dañar a un usuario

Tabla 3: Comparación Softrobotics

### 1.3. Objetivos

Una vez hecha la introducción de ese trabajo se procederá a enunciar tanto el objetivo final de este trabajo, como los objetivos parciales que se han ido consiguiendo a lo largo de la realización de este.

El objetivo principal de este trabajo es:

**“la implementación de una pinza robótica low-cost para la manipulación de objetos pequeños”**

Además a lo largo del trabajo se irán cumpliendo una serie de objetivos secundarios que además ayudarán a llegar a la conclusión final.

- 1) La herramienta debe tener un peso, en su conjunto lo más ligero posible para maximizar la carga útil del robot.
- 2) Control por medio de un solo actuador eléctrico.
- 3) Comunicación por CanOpen (canbus).
- 4) Incorporación de sistema de seguridad.

#### **1.4. Material y Métodos**

Para realizar los objetivos anteriormente enumerados será necesario recurrir a diversas herramientas y programas de software.

##### **1.4.1. Working Model**

Este programa es una herramienta que permite realizar simulaciones del movimiento de sistemas mecánicos en 2 dimensiones, lo cual permite una visión del movimiento de dicho sistema y ahorrar tiempo en la fabricación de prototipos.

Incluye detección automática de colisión y permite la visualización de las simulaciones con gran variedad de representaciones como vectores animados, barras de líneas, medidas métricas, etc. [21].

Algunas de sus características son:

- Analiza el último diseño midiendo fuerza, par, aceleración, etc. E interaccionando con cualquier objeto.
- Importa los dibujos CAD en 2D en formato DXF.
- Permite la creación de cuerpos y puede definir propiedades, velocidad inicial, cargas etc.
- Simula contactos, colisiones y fricción.
- Analiza estructuras con elementos flexibles.

##### **1.4.2. Autodesk Autocad**

Este es un programa de diseño CAD para dibujo en 2D y 3D que dispone de una pantalla gráfica en la que es posible crear diseños gracias a las herramientas para crear entidades geométricas (líneas, círculos arcos, etc.).

La extensión de los archivos de Autocad es .dwg aunque el programa permite exportar en otro formatos, el más conocido es el .dxf, este último permite compartir dibujos con otras plataformas tales como, en el caso de este trabajo, el programa Working Model, reservándose Autocad el formato .dwg para sí mismo [22].



#### **1.4.3. Autodesk Inventor**

Inventor es un programa de diseño 3D que dispone de varios modos de edición, en el modo sólido se pueden crear las piezas 3D gracias a herramientas que permiten crear distintas entidades geométricas con las que se pueden operar en el llamado editor de dibujo de esta manera se pueden crear bocetos 2D con los que crear cuerpos 3D con herramientas como la de extrusión.

En el modo ensamblaje es posible insertar piezas, previamente creados en el modo explicado anteriormente y crear restricciones de unión entre ellas para poder crear un sistema completo formado por todas estas piezas, además este modo tiene una herramienta muy interesante y muy útil para la realización de este trabajo tal como es la creación de engranajes según los datos insertados en el cuadro emergente.

#### **1.4.4. Repetier-Host**

Repetier-Host es un programa de gestión de impresión 3D muy fácil e intuitivo, dispone de una ventana gráfica desde la que se pueden posicionar y orientar una o varias piezas para su posterior impresión.

También cuenta con una ventana en la que gracias al programa de laminación slic3r el programa crea los movimientos para la impresión, aportando además una vista gráfica de dicha laminación.

Cuenta además con una pestaña de control manual, desde la que se puede mover el extrusor, calentarlo, calentar la cama e incluso extruir.

#### **1.4.5. Arduino IDE**

Este es el programa de arduino descargable gratuitamente desde su página oficial, este programa permite escribir, verificar y transferir los programas a la tarjeta arduino.

## 2. DESARROLLO

### **2.1. Diseño y simulación**

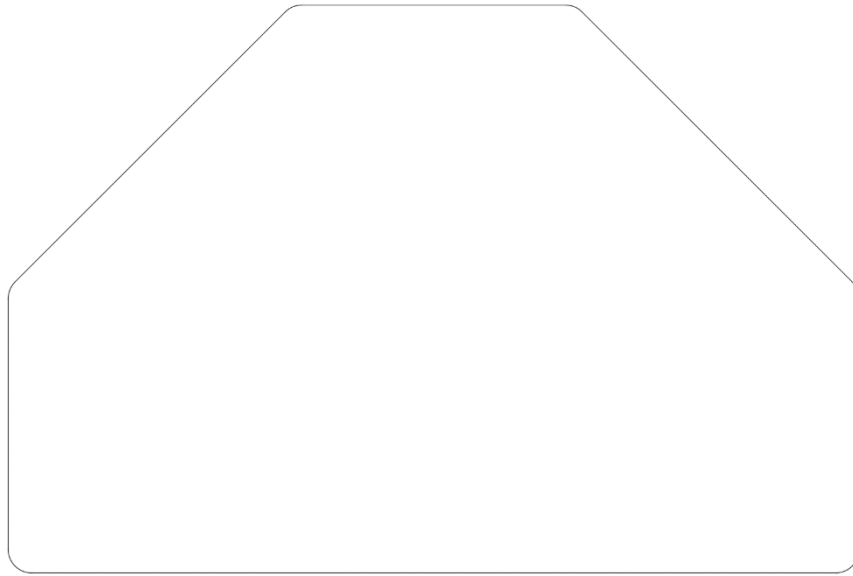
Como ya se ha expuesto, el primer objetivo es el diseño, con las respectivas simulaciones en Working Model, de varios tipos de transmisión de movimiento.

Para realizar esta tarea es necesario determinar unos parámetros a respetar por estos diseños, tales como que esta debe contar con un solo motor, esto es debido a que es necesario minimizar el peso de la pinza para disminuir lo menos posible la carga útil del robot, además el material a utilizar será ABS dado que se quiere minimizar el coste.

Además, se utilizará una estructura en paralelogramo para garantizar que el cierre se realiza de forma paralela, ya que este sistema es el mismo que tiene implementada la pinza del robot AMOR, el cual es capaz de manipular objetos pequeños con facilidad.

Antes de realizar estas simulaciones es necesario realizar primero un diseño preliminar de las piezas en 2D gracias a Autodesk Autocad que posteriormente importaremos al programa Working Model (gracias al formato .dxf).

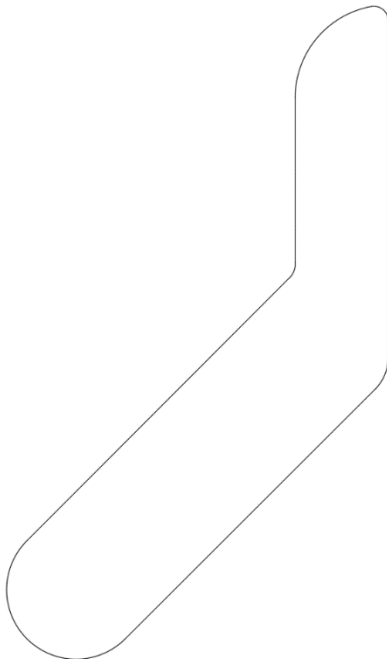
### 2.1.1. Diseños en Autocad:



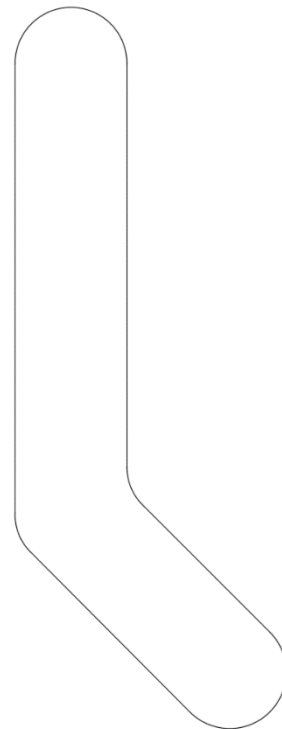
*Figura 33: Base Pinza (Working Model)*



*Figura 34: Lado Pinza (Working Model)*



*Figura 35: Pieza final Pinza (Working Model)*



*Figura 36: Lado extra Pinza (Working Model)*

## 2.1.2. Simulaciones

### 2.1.2.a. Pinza 1: Tendones

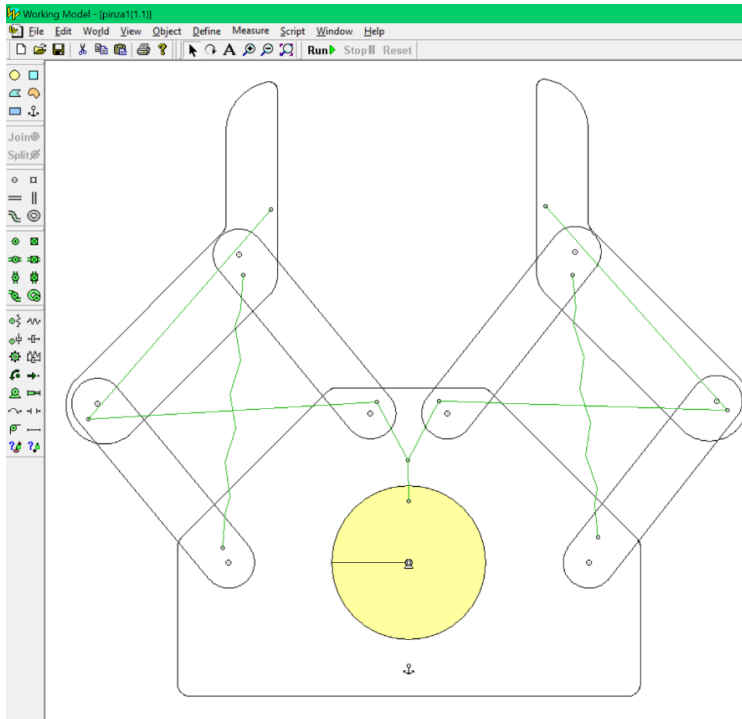


Figura 37: Pinza de tendones abierta

Debido a que un gran número de pinzas/manos, tanto comerciales como no comerciales, funcionan gracias a tendones se decidió hacer un primer diseño con este tipo de transmisión.

Como se ha explicado lo primero es realizar los diseños 2D con el programa Autocad, para esta pinza utilizaremos las piezas de las figuras 34, 35 y 36 con sus respectivas copias y reflejos.

La posición de reposo de la pinza es abierta, esto se debe gracias a los muelles (líneas en zigzag verdes) que se encuentran en reposo mientras la pinza se encuentra en este estado. La pinza se abre gracias a la acción del motor que tira de los tendones, como se puede apreciar en las posiciones de la pieza circular accionada por el motor (círculo amarillo).

Desventajas: El problema de tratar con tendones (necesarios cables con buena resistencia, problema de alojamiento en la pinza), además del problema de tratar con muelles (necesario vencer la fuerza del muelle para cerrar la pinza).

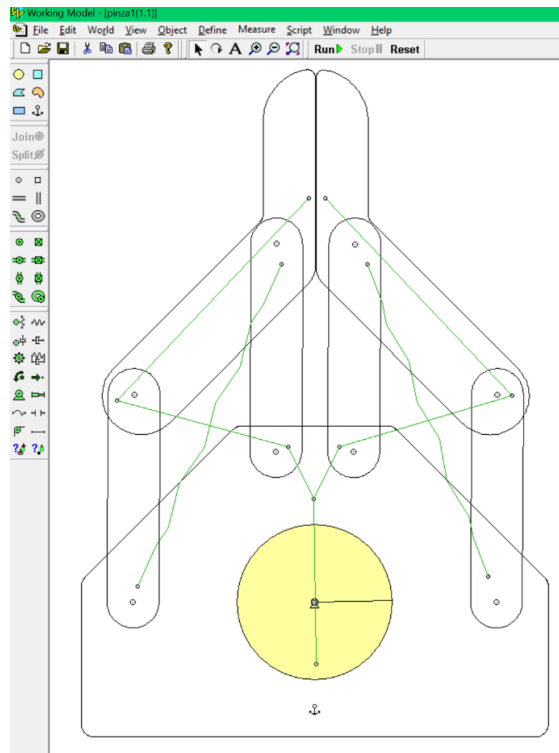


Figura 38: Pinza de tendones cerrada

### 2.1.2.b. Pinza 2: Pasador-Ranura

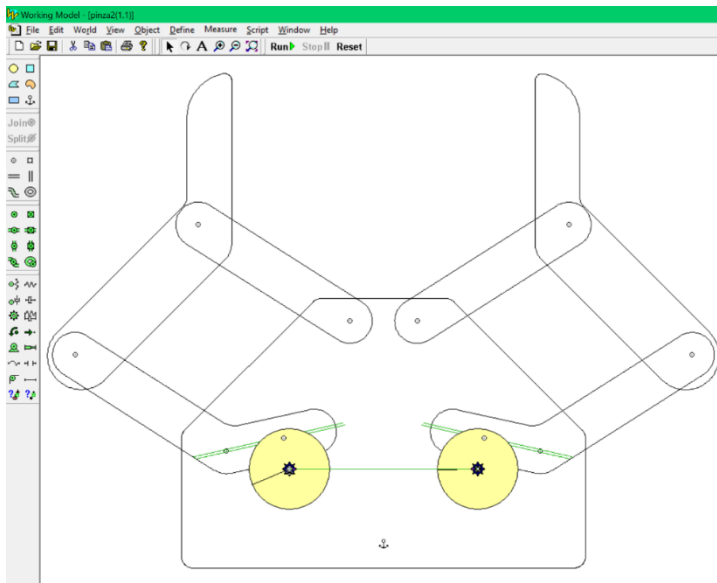


Figura 39: Pinza Pasador-ranura abierta

La idea para este tipo de transmisión ha sido tomada del tipo de transmisión utilizada para el proyecto Pressmatic el cual forma parte de Robohealth.

Para este diseño se utilizarán todas las piezas anteriormente diseñadas con sus respectivas copias y reflejos.

La rotación del motor controla completamente la posición de la pinza, el motor actúa sobre uno de los engranajes (piezas circulares amarillas) los cuales cuentan con un pasador que se encarga de empujar la pieza de la figura 37, esta dispone de una ranura la cual permite el movimiento a lo largo de esta pieza y posibilita el movimiento de la pinza.

Desventajas: Debido al tipo de interacción entre el pasador de los engranajes y la pieza con la ranura hay una gran cantidad de pérdidas por rozamiento, lo cual disminuye la fuerza transmitida por el motor al final de la pinza, esto además conlleva una gran cantidad de desgaste teniendo en cuenta el tipo de material a utilizar además de la necesidad de usar un pasador de un material diferente al ABS.

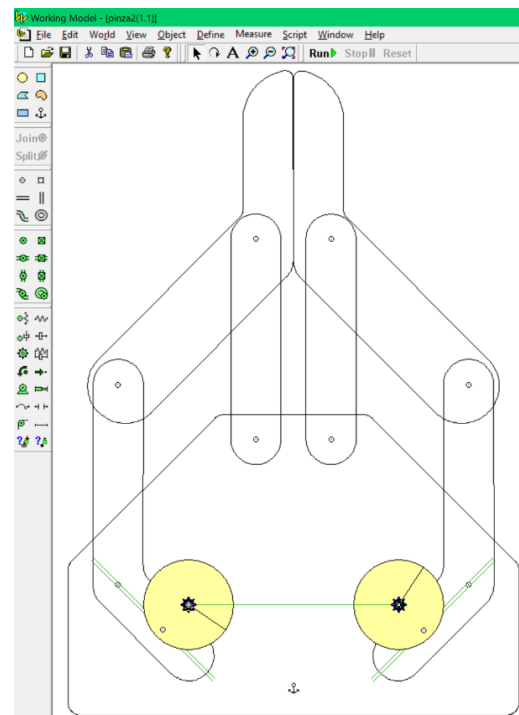


Figura 40: Pinza Pasador-ranura cerrada

Ventajas: Sencillez de diseño de las piezas.

### 2.1.2.c. Pinza 3: Tornillo sin fin

Se ha hecho una simulación con esta transmisión ya que también se utiliza en varias de las pinzas no comerciales.

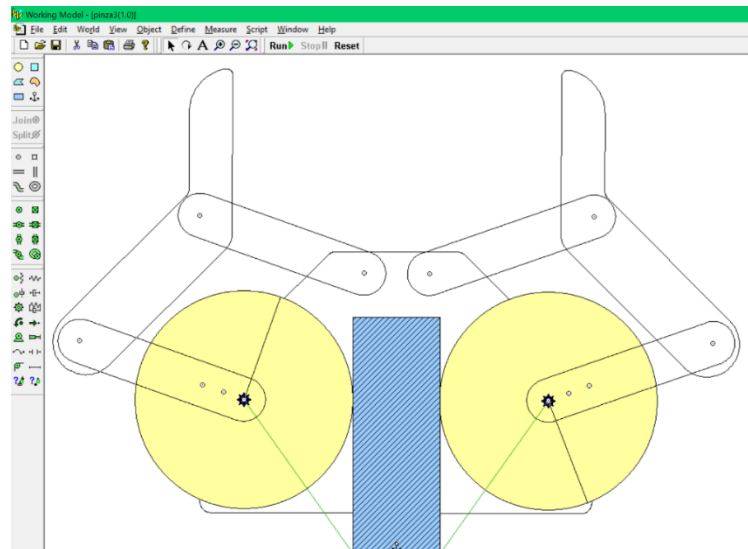


Figura 41: Pinza tornillo sin fin abierta

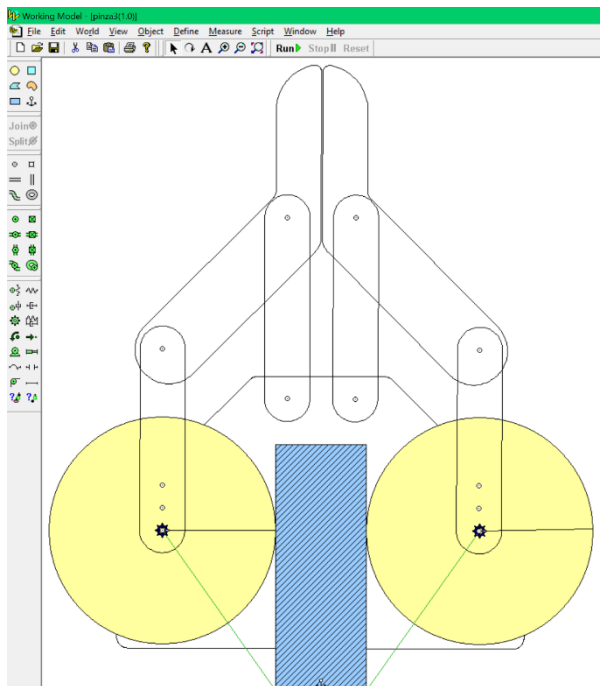


Figura 42: Pinza tornillo sin fin cerrada

En este tipo de pinza el motor transmitirá el giro al tornillo sin fin, el cual a su vez transmitirá el movimiento a los dos engranajes (piezas circulares amarillas) que estando anclados a las piezas alargadas de las pinzas abrirán y cerrarán la pinza invirtiendo el giro del motor.

Desventajas: Se produce un gran rozamiento y con ello un gran desgaste.

Ventajas: Tornillo sin fin de latón ya disponible en el laboratorio, bloqueo de la pinza con el motor en reposo.

### Elección:

Una vez hechos los diseños anteriores con sus respectivas simulaciones se ha de escoger una de las opciones, tras pensar en las ventajas y desventajas de cada una, se ha decidido utilizar el tercer diseño para realizar el resto del proyecto.

## 2.2. Primer Prototipado

Una vez escogido el tipo de transmisión a utilizar se comenzarán a diseñar las piezas para el primer prototipo y para ello lo primero que se hará es calcular algunas de las medidas necesarias para estas piezas.

En primer lugar se quiere una apertura aproximada de 10 cm por lo que servirá para calcular una longitud de la primera falange que posibilite esta condición:

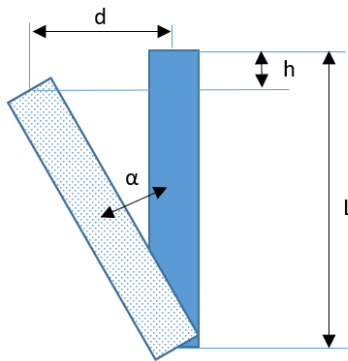


Figura 43: Cálculos para longitud de lado

Dado que lo que se mueve una parte de la pinza es “d” entonces la expresión de la apertura será:

$$\text{Apertura} = 2 * \text{sen}(\alpha) * l$$

Mientras que “h” será la longitud que baja el extremo de la pinza y cuya expresión es:

$$h = l - \cos(\alpha) * l$$

Sabiendo estas expresiones procederemos a calcular una longitud de lado aceptable dado que si fueran 5 centímetros el ángulo debería ser 90 grados, por tanto:

$l = 6 \text{ cm}$	$l = 7 \text{ cm}$
$10 = 2 * \text{sen}(\alpha) * 6$ $\text{sen}(\alpha) \approx 0,833$ $\alpha \approx 56,44^\circ$	$10 = 2 * \text{sen}(\alpha) * 7$ $\text{sen}(\alpha) \approx 0,714$ $\alpha \approx 45,58^\circ$
$h = 6 - \cos(56,44^\circ) * 6$ $h \approx 2,68 \text{ cm}$	$h = 7 - \cos(45,58^\circ) * 7$ $h \approx 2,1 \text{ cm}$

Tabla 4: Cálculos para longitud de lado (primer prototipo)

Teniendo estos últimos cálculos en cuenta se decidió darle una medida a la primera falange de 6 centímetros.

Otra medida a tener en cuenta es la distancia entre centros de los engranajes y el tornillo sin fin, para ello se averiguó que el modulo del tornillo sin fin es 0.8 mientras que su radio máximo es de 11,6 mm, con estos datos y la herramienta disponible en el programa Autodesk Inventor, ha sido posible conseguir un diseño de un engranaje con el modulo necesario, 32 dientes y con un radio mínimo de 23,6 mm, por lo que se puede calcular que la última medida que se necesita es de 17,6 mm.



Por último, para diseñar la pieza que albergará el motor (Pieza Base) es necesario saber las dimensiones de este, para ello a su vez es necesario estimar un par motor, este se calculará teniendo en cuenta que se quiere una fuerza mínima en la punta de 1 N, para ello se realizan los siguientes cálculos:

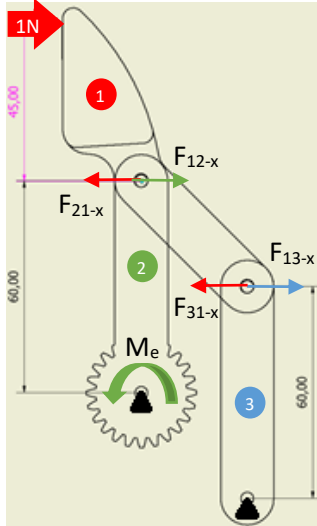


Figura 44: Cálculos fuerza (1)

Teniendo en cuenta que según el esquema de fuerzas de la figura 44 el mecanismo debe permanecer en equilibrio, se puede afirmar que la pieza 3 no ejerce (ni se ejerce sobre ella) ninguna fuerza en el eje horizontal según se puede ver gracias a la ecuación:

$$\Sigma M_{Apoyo3} = 0 ; F_{13-x} = 0 = -F_{31-x}$$

Por lo que haciendo la ecuación de fuerzas de la pieza 1:

$$\Sigma F = 0 ; 1 \text{ N} = F_{21-x} = -F_{12-x}$$

A continuación se puede calcular el momento necesario en el engranaje gracias a la ecuación de momento en el apoyo de la pieza 2:

$$\Sigma M_{Apoyo2} = 0 ; F_{12-x} * 0,06 = M_e \Rightarrow M_e = 0,06 \text{ N} * m$$

Una vez conseguido el momento necesario en el engranaje se podrá conseguir la fuerza mínima necesaria del motor utilizando los siguientes datos y con las siguientes formulas:

Tornillo sin fin	$d_m/2 = r_m = 5 \text{ mm}$	$Z_1 = 1$ (nº filetes)	$p = 2,513 \text{ mm}$ (paso)	$\alpha = 20^\circ$ (ángulo de presión)
Otros	$f = 0,5 \Rightarrow$ Se utiliza este valor de rozamiento entre el tornillo de latón y el engranaje de ABS debido a que al no haber podido encontrar un valor entre estos dos materiales se ha utilizado el más restrictivo de los dos [25] (ABS con ABS [24]).			$d_p = 25,6 \text{ mm}$ (Diámetro primitivo del engranaje)

Tabla 5: Datos para Fuerza

$$F_{t2} = \frac{M_e}{r_p} = \frac{0,06}{0,0128} = 4,688 \text{ N}$$

Fuerza tangencial de la rueda

$$\tan \gamma = \frac{Z_1 * p}{\pi * d_m} = \frac{1 * 2,513}{\pi * 10} = 0,08 \Rightarrow \gamma = 4,574^\circ$$

Ángulo de avance

$$\tan \rho = \frac{f}{\cos \alpha} = \frac{0,5}{\cos(20^\circ)} = 0,532 \Rightarrow \rho = 28,017^\circ$$

Ángulo de rozamiento

$$F_{a1} = F_{t2}$$

Fuerza axial en el sinfin

$$M_t = F_{a1} * r_m * \tan(\gamma + \rho) = 4,688 * 0,005 * \tan(32,591^\circ) = 15 \text{ mN/m}$$

Teniendo en cuenta que existe un rozamiento en las uniones entre piezas, el cual no es demasiado grande al disponer las piezas intermedias orificios pasantes (lo cual impide grandes fuerzas normales entre las superficies) Se ha decidido utilizar el motor RS Pro 5350344 el cual dispone de un par motor de 60 mN/m.

A continuación se va a calcular la fuerza en su extremo volviendo a utilizar las mismas ecuaciones pero en sentido contrario y estimando que el rozamiento anteriormente mencionado reduce a un tercio de la fuerza total transmitida por el motor (n=3).

$$F_{a1} = \frac{M_t/n}{r_m * \tan(\gamma + \rho)} = \frac{0,06/3}{0,005 * \tan(32,591^\circ)} = 6,2568N$$

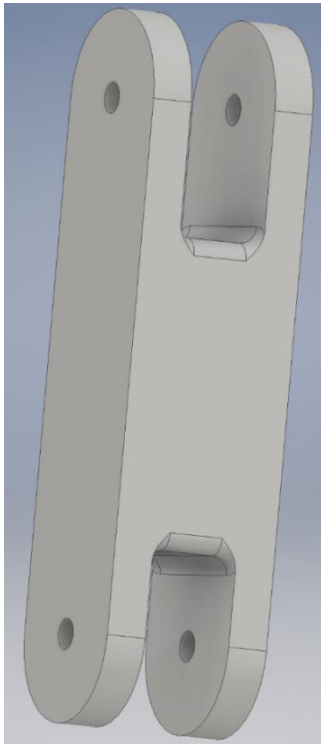
$$F_{a1} = F_{t2}$$

$$M_e = F_{t2} * r_p = 6,2568 * 0,0128 = 0,08 \text{ N/m}$$

$$\Sigma M_{Apoyo2} = 0 ; M_e = F_{12-x} * 0,06 \Rightarrow F_{12-x} = 1,33N = |F_{21-x}|$$

$$F_{extremo} = F_{21-x} = 1,33N$$

### 2.2.1. Diseño (primer prototipo)



Pieza: Lado

Esta pieza ha sido diseñada teniendo en cuenta que la longitud entre los agujeros para los pasadores (cuyo diámetro es de 3 mm) debe ser de 6 cm, mientras que el grosor se ha elegido teniendo en cuenta que el material que se va a utilizar no tiene una gran resistencia.

Figura 45: Modelo Pieza Lado (1)

Pieza: Lado-engranaje

Esta pieza al igual que la anterior debe respetar la longitud de 6 cm entre las uniones y el grosor del engranaje teniendo en cuenta que debe hacer buen contacto con además las medidas de las ranuras han sido calculadas gracias al mismo programa de diseño.

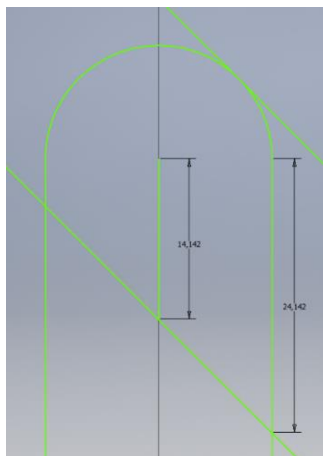


Figura 47: Cálculos ranuras (1)

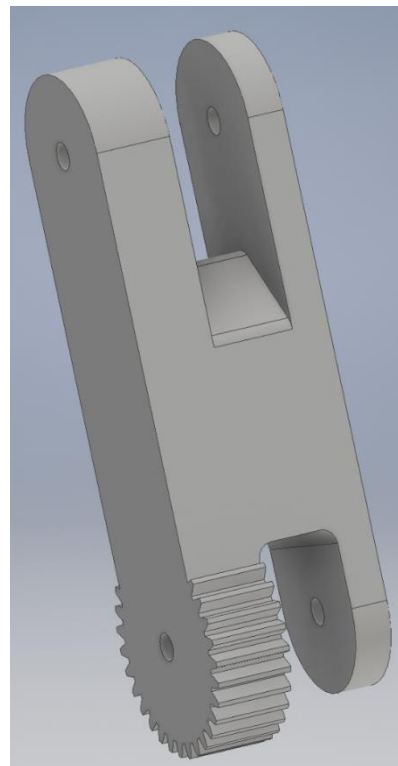
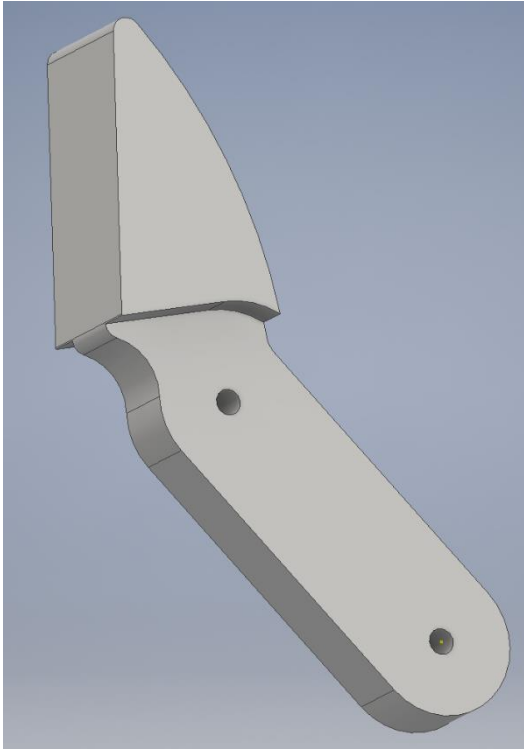


Figura 46: Modelo Pieza Lado-engranaje (1)



*Figura 48: Modelo Pieza Pinza (1)*

#### Pieza: Pinza

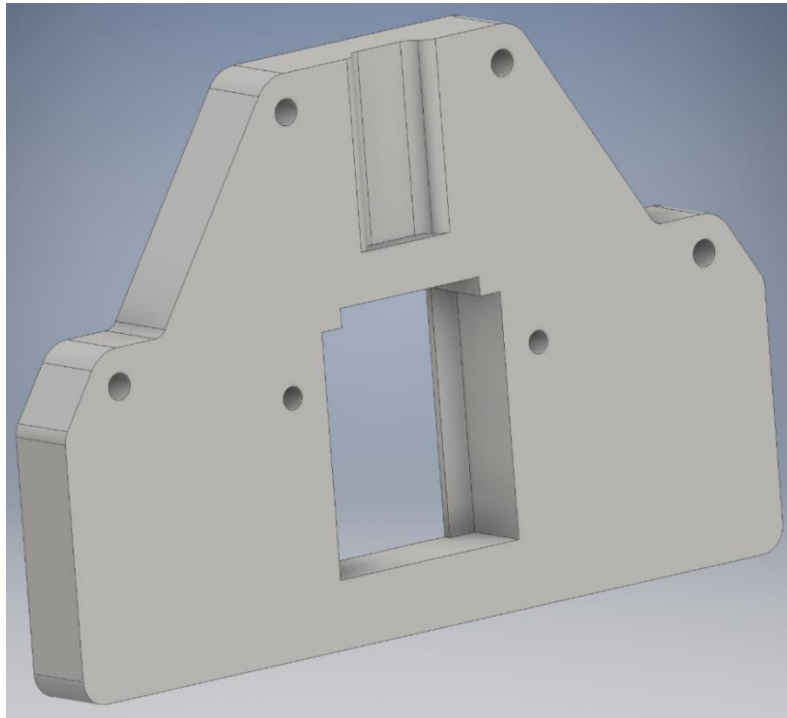
Esta pieza se ha diseñado teniendo en cuenta la longitud entre centros del engranaje y el tornillo sin fin (17,6 mm) siendo esta la distancia que tiene que haber entre el plano que hará contacto con el otro lado de la pinza y el primer agujero, mientras que la distancia entre los dos agujeros ha sido determinada por el grosor de las dos piezas anteriores

#### Pieza: Base

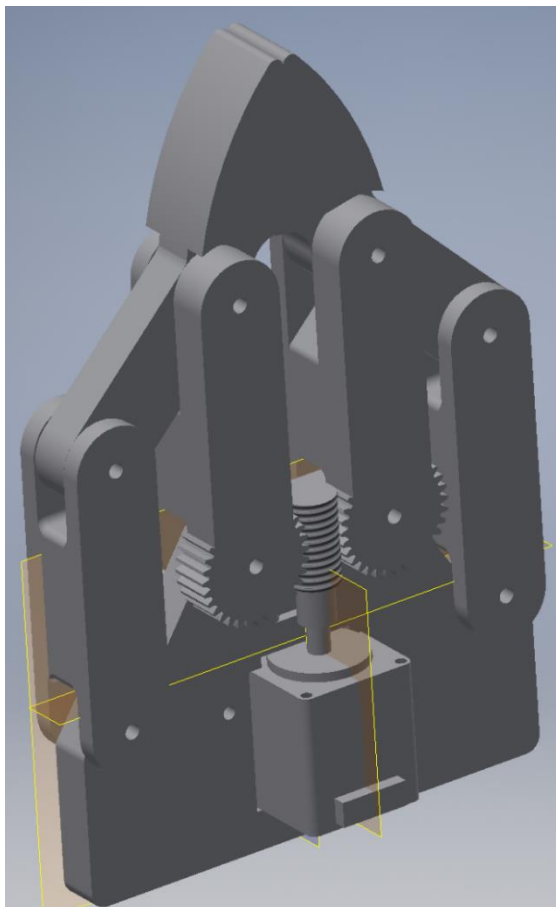
Por último se diseñará la base sobre la cual se ensamblarán las demás piezas incluido el motor, para diseñarlo se han tenido en cuenta en primer lugar las distancias y el ángulo entre agujeros, los cual deben ser el mismos que el de la pieza anterior, los ángulos de las rampas entre los agujeros son de  $56,44^\circ$  dado que este ángulo debe ser garantizado para cumplir la condición de una apertura de 10 cm.

El agujero del centro está hecho para alojar el motor (cuyo modelo se muestra en la figura 51) por lo que sus dimensiones son las del motor para que encaje correctamente y el cajeado superior es para asegurar que no haya ningún contacto entre el tornillo sin fin y esta pieza.

Por último los tornillos a los lados del agujero del motor están hechos para que, en caso de que este prototipo sea el definitivo, poder hacer una base para unir la pinza con el portaherramientas.

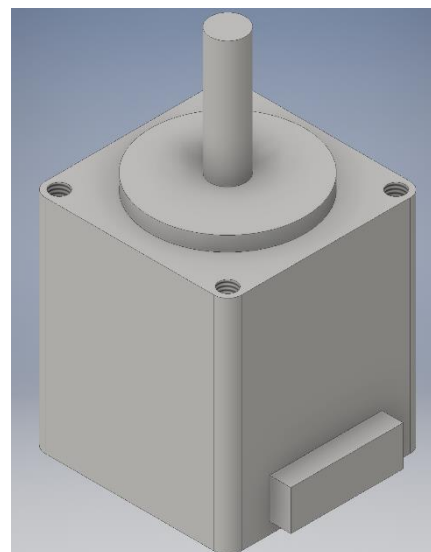


*Figura 49: Modelo Pieza Base (1)*



*Figura 51: Modelo primer prototipo*

Ensamblando todas las piezas, el modelo queda tal y como muestra la figura 50.



*Figura 50: Modelo Motor*



### 2.2.2. Impresión (primer prototipo)

Una vez hechos los diseños y verificado que ensamblan correctamente, se imprimirán gracias al programa Repetier y las impresoras 3D del laboratorio, las cuales disponen de ABS (blanco y negro).

A continuación se adjunta una tabla con las principales características de la impresión de cada pieza.

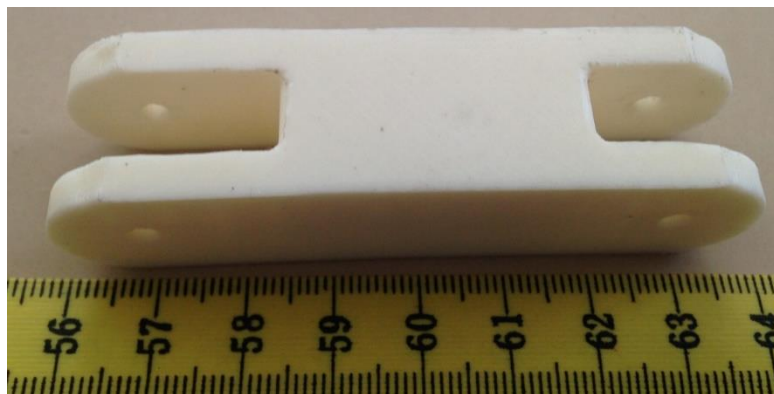
Nombre	Relleno	Material de soporte	Temperatura de impresión	Color	Nº de piezas	Longitud de filamento	Tiempo de impresión
Lado	0,15	NO	235	Blanco	2	1366 mm	45m 33s
Lado-engranaje	0,15	SI	235	Blanco	2	2899 mm	1h 26m 4s
Pinza	0,15	SI	235	Blanco	2	1486 mm	48m 3s
Base	0,2	NO	225	Negro	1	3307 mm	1h 43m 42s

*Tabla 6: Impresión primer prototipo*

Las piezas se imprimen en la posición con la que se muestran en las figuras adjuntas a continuación y de ahí la necesidad de las piezas Lado-engranaje y Pinza de utilizar material de soporte.

Pieza: Lado

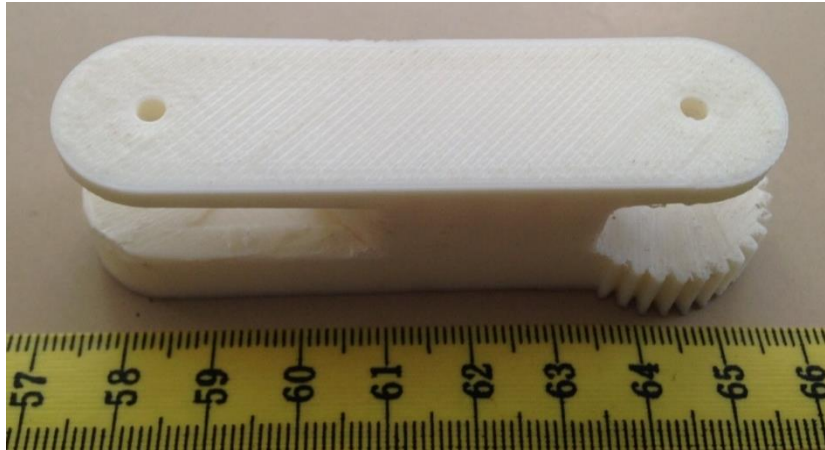
Dado que esta pieza dispone de un grosor considerable, no va a soportar grandes esfuerzos y además está impresa en de tal forma que resiste mejor estos pocos esfuerzos se ha considerado que no es necesario imprimirla con un gran porcentaje de relleno.



*Figura 52: Pieza Lado (1)*

#### Pieza: Lado-engranaje

Como se ha mencionado esta pieza se ha impreso en la posición en la que aparece en la figura, esto se debe a que se necesita que el engranaje quede lo más exacto posible, cosa que se facilitaba apoyando este sobre la cama caliente de la impresora 3D a diferencia de la pieza anterior.



*Figura 53: Pieza Lado-engranaje (1)*

#### Pieza: Pinza

Una vez impresa esta pieza, se ha comprobado que el ensanchamiento en la parte extrema no impida la apertura completa de la pinza.



*Figura 54: Pieza Pinza (1)*



### Pieza: Base

Dado que esta pieza es la que hará de anclaje para las demás piezas se ha decidido aumentar un poco su porcentaje de relleno respecto a las demás piezas.

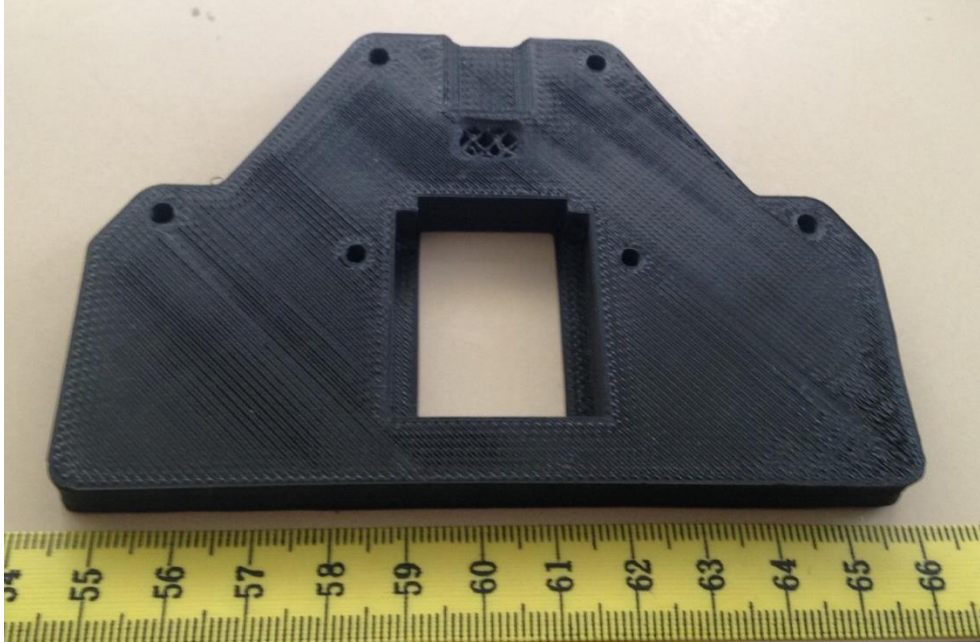
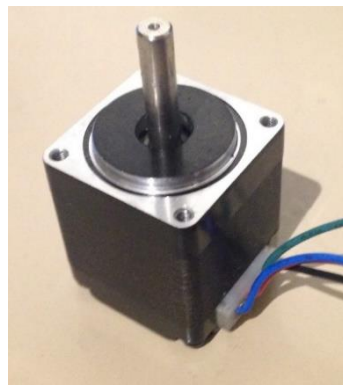


Figura 55: Pieza Base (1)

### Motor y tornillo



(a)



(b)

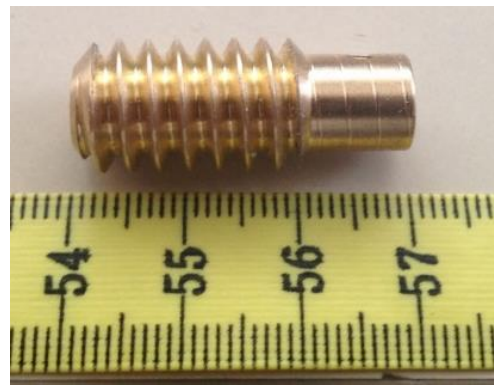
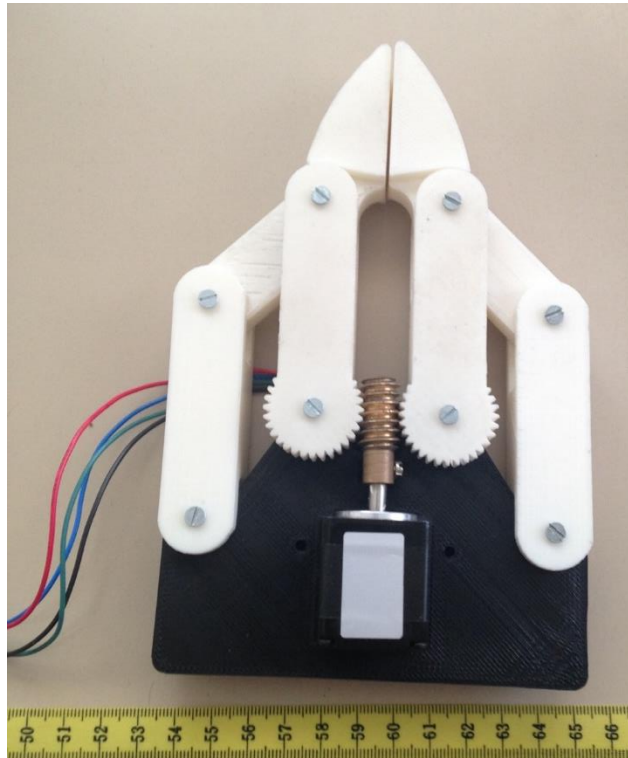


Figura 56: tornillo sin fin

Figura 57: Motor

Una vez impresas y montadas todas las piezas como se puede ver en la figura 58 se ha decidido hacer una segunda iteración con medidas más pequeñas, ya que esta ocupa un gran espacio, para que el tamaño se asemeje más al de la garra del robot AMOR.



*Figura 58: Primer prototipo*

## 3. IMPLEMENTACIÓN FINAL

### 3.1. Segundo Prototipo

Para realizar el nuevo prototipo se definirá una nueva apertura aproximada de 6 cm, por lo que haciendo el mismo cálculo que se hizo para la pinza anterior y por tanto contando con las siguientes expresiones:

$$Apertura = 2 * \text{sen}(\alpha) * l$$

$$h = l - \cos(\alpha) * l$$

$l = 4 \text{ cm}$	$l = 5 \text{ cm}$
$6 = 2 * \text{sen}(\alpha) * 4$	$6 = 2 * \text{sen}(\alpha) * 5$
$\text{sen}(\alpha) = 0,75$	$\text{sen}(\alpha) = 0,6$
$\alpha \approx 48,59^\circ$	$\alpha \approx 36,87^\circ$
$h = 4 - \cos(48,59^\circ) * 4$	$h = 5 - \cos(36,87^\circ) * 5$
$h \approx 1,35 \text{ cm}$	$h \approx 1 \text{ cm}$

Tabla 7: Cálculos longitud de lado (segundo prototipo)

Con estos cálculos se ha decidido tomar un valor de  $L=4 \text{ cm}$ , además dado que gracias al primer prototipo se ha comprobado que las piezas tienen buena resistencia por lo que también se disminuirán los grosores, también es necesario hallar una nueva distancia entre los centros de los engranajes y el tornillo, ya que los engranajes anteriores para las nuevas medidas son demasiado grandes, por lo que utilizando el programa se ha decidido utilizar un engranaje con el modulo correcto (0.8), 24 dientes y 17,6 mm de radio mínimo. Por tanto la distancia entre los centros será de 14,6 mm.

Por último, para diseñar la pieza Base es necesario verificar las dimensiones a usar por lo que es necesario estimar de nuevo el par motor teniendo en cuenta que se quiere una fuerza mínima de 1 N gracias a los siguientes cálculos:

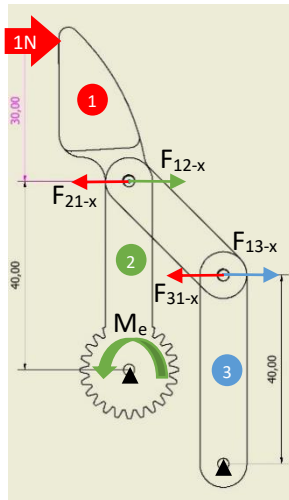


Figura 59: Cálculos fuerza (2)

Teniendo en cuenta que según el esquema de fuerzas de la figura 44 el mecanismo debe permanecer en equilibrio, se puede afirmar que la pieza 3 no ejerce (ni se ejerce sobre ella) ninguna fuerza en el eje horizontal gracias a la ecuación:

$$\Sigma M_{Apoyo3} = 0 ; F_{13-x} = 0 = F_{31-x}$$

Por lo que según la ecuación de fuerzas de la pieza 1:

$$\Sigma F = 0 ; 1 \text{ N} = F_{21-x} = -F_{12-x}$$

A continuación se puede calcular el momento necesario en el engranaje gracias a la ecuación de momento en el apoyo de la pieza 2:

$$\Sigma M_{Apoyo2} = 0 ; F_{12-x} * 0,04 = M_e \Rightarrow M_e = 0,04 \text{ N} * m$$

Una vez conseguido el momento necesario en el engranaje se podrá conseguir la fuerza mínima necesaria del motor utilizando los siguientes datos y con las siguientes formulas:

Tornillo sin fin	$r_m = d_m/2 = 5 \text{ mm}$	$Z_1 = 1$ (nº filetes)	$p = 2,513 \text{ mm}$ (paso)	$\alpha = 20^\circ$ (ángulo de presión)
Otros	$f = 0,5 \Rightarrow$ Se utiliza este valor de rozamiento entre el tornillo de latón y el engranaje de ABS debido a que al no haber podido encontrar un valor entre estos dos materiales se ha utilizado el más restrictivo de los dos [25] (ABS con ABS [24]).			$d_p = 19,2 \text{ mm}$ (Diámetro primitivo del engranaje)

Tabla 8: Datos para Fuerza (2)

$$F_{t2} = \frac{M_e}{r_p} = \frac{0,04}{0,0096} = 4,167 \text{ N}$$

Fuerza tangencial de la rueda

$$\tan \gamma = \frac{Z_1 * p}{\pi * d_m} = \frac{1 * 2,513}{\pi * 10} = 0,08 \Rightarrow \gamma = 4,574^\circ$$

Ángulo de avance

$$\tan \rho = \frac{f}{\cos \alpha} = \frac{0,5}{\cos(20^\circ)} = 0,532 \Rightarrow \rho = 28,017^\circ$$

Ángulo de rozamiento

$$F_{a1} = F_{t2}$$

Fuerza axial en el sinfin

$$M_t = F_{a1} * r_m * \tan(\gamma + \rho) = 4,167 * 0,005 * \tan(32,591^\circ) = 13,32 \text{ mN/m}$$

Aunque sigan existiendo las pérdidas por rozamiento entre las uniones de las piezas, teniendo en cuenta que la fuerza necesaria para disponer de una fuerza de 1 N en la punta de la pinza es menor que para el diseño anterior, se ha decidido seguir utilizando el mismo motor que se utilizó para el prototipo anterior.

Dado que se utilizará este motor se va a calcular la fuerza en su extremo estimando que el rozamiento anteriormente mencionado reduce a un tercio de la fuerza total transmitida por el motor ( $n=3$ ).

$$F_{a1} = \frac{M_t/n}{r_m * \tan(\gamma + \rho)} = \frac{0,06/3}{0,005 * \tan(32,591^\circ)} = 6,2568N$$

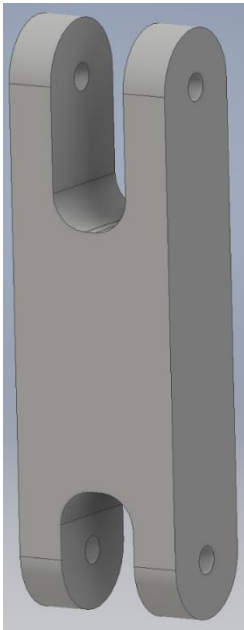
$$F_{a1} = F_{t2}$$

$$M_e = F_{t2} * r_p = 6,2568 * 0,0096 = 0,06 N * m$$

$$\Sigma M_{Apoyo2} = 0 ; M_e = F_{12-x} * 0,04 \Rightarrow F_{12-x} = 1,5N = |F_{21-x}|$$

$$F_{extremo} = F_{21-x} = 1,5N$$

### 3.1.1. Diseño (segundo prototipo)



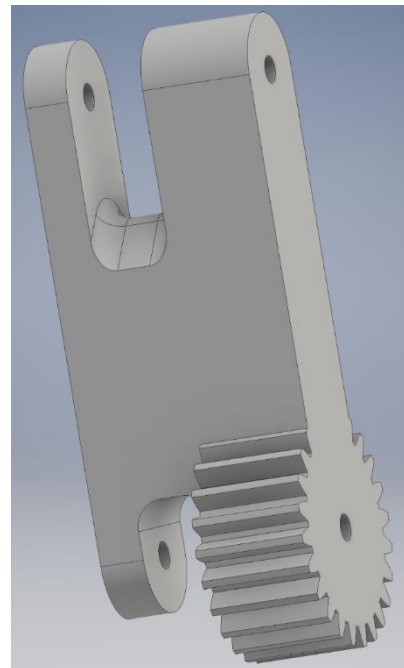
Pieza: Lado

A diferencia de la pieza lado del prototipo anterior, la distancia entre agujeros es de 4 cm, de acuerdo con los cálculos anteriores y como también se ha dicho, los grosores son menores.

*Figura 60: Modelo Pieza Lado (2)*

Pieza: Lado-engranaje

Para esta pieza (al igual que en la anterior) se han modificado grosores y longitudes, a excepción del grosor de la parte del engranaje, dado que este debe ser el mismo para garantizar un buen contacto engranaje-tornillo.



*Figura 61: Modelo Pieza Lado-engranaje (2)*

Pieza: Pinza

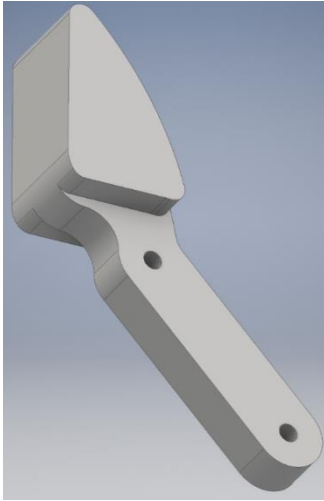


Figura 62: Modelo Pieza Pinza (2)

Esta pieza respeta la distancia de 14,6 cm además de la medida entre agujeros se ha disminuido debido a la premisa de disminuir el tamaño de la pinza y gracias a la disminución del grosor de las piezas anteriores.

#### Pieza: Base

Respecto a la base del prototipo anterior se conservan tanto el lugar de alojamiento del motor como los agujeros para las futuras piezas que permitan el anclaje al portaherramientas del robot Asibot, en cuanto a la distancia entre agujeros para el ensamblaje de las piezas es el correcto para garantizar el paralelismo entre los lados de la estructura en paralelogramo, además el ángulo de las rampas es de  $60^\circ$  para garantizar que la posición de la pinza pueda formar el ángulo de  $48,59^\circ$  necesario para que la pinza se abra 6 cm.

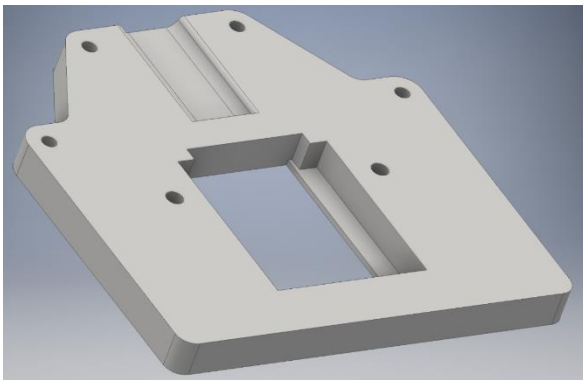


Figura 63: Modelo Pieza Base (2)

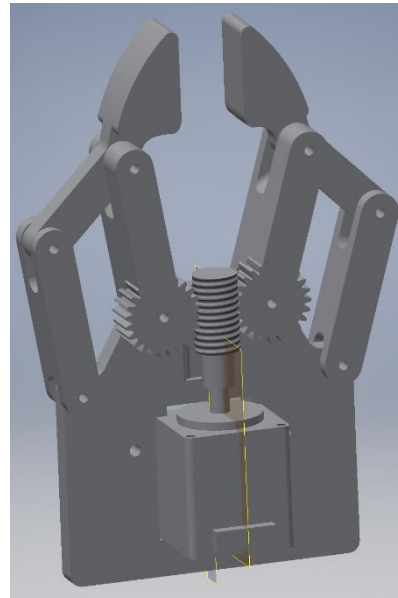


Figura 64: Modelo segundo prototipo



### 3.1.2. Impresión (segundo prototipo)

Una vez más se procederá a imprimir el prototipo gracias a las impresoras 3D del laboratorio

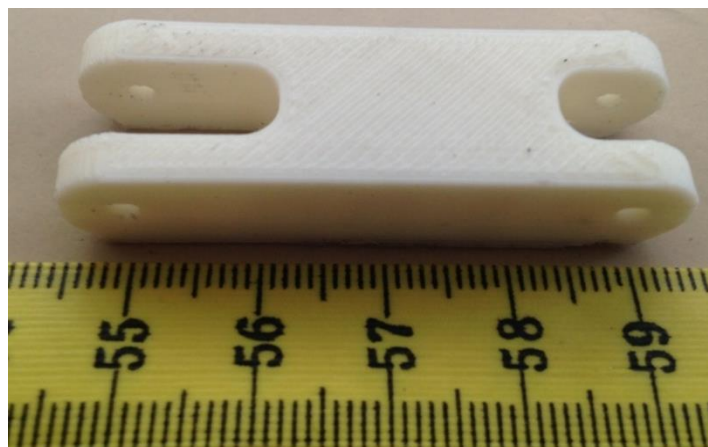
Nombre	Relleno	Material de soporte	Temperatura de impresión	Color	Nº de piezas	Longitud de filamento	Tiempo de impresión
Lado	0,20	NO	235	Blanco	2	458 mm	16m 11s
Lado-engranaje	0,20	SI	235	Blanco	2	1070 mm	36m 51s
Pinza	0,20	SI	225	Negro	2	597 mm	22m 34s
Base	0,25	NO	225	Negro	1	1925 mm	1h 1m 57s

*Tabla 9: Impresión segundo prototipo*

Como se puede observar en la tabla, se ha decidido incrementar el porcentaje de relleno de las piezas, esto se debe a la reducción de grosores para disminuir el tamaño.

Pieza: Lado

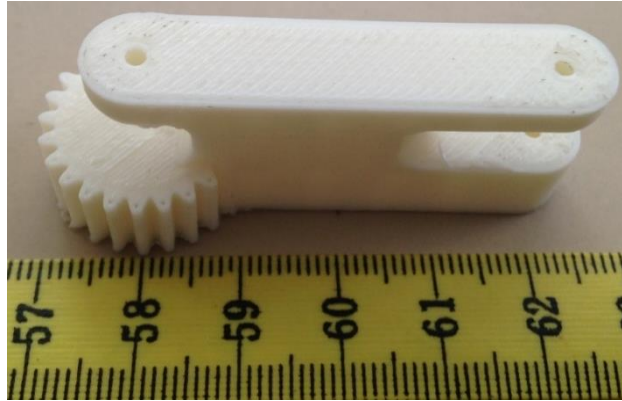
Dado que el resultado obtenido de la impresión de la misma pieza en el primer prototipo ha sido correcto, se ha utilizado la misma posición y mismos parámetros.



*Figura 65: Pieza Lado (2)*

#### Pieza: Lado-engranaje

En este caso, aunque sigue siendo la misma posición para la misma pieza del prototipo anterior, se ha cambiado la disposición del material de soporte ya que el anterior presentó mucha dificultad a la hora de separar este del resto de la pieza, con este cambio el resultado ha sido muy satisfactorio.



*Figura 66: Pieza Lado-engranaje (2)*

#### Pieza: Pinza

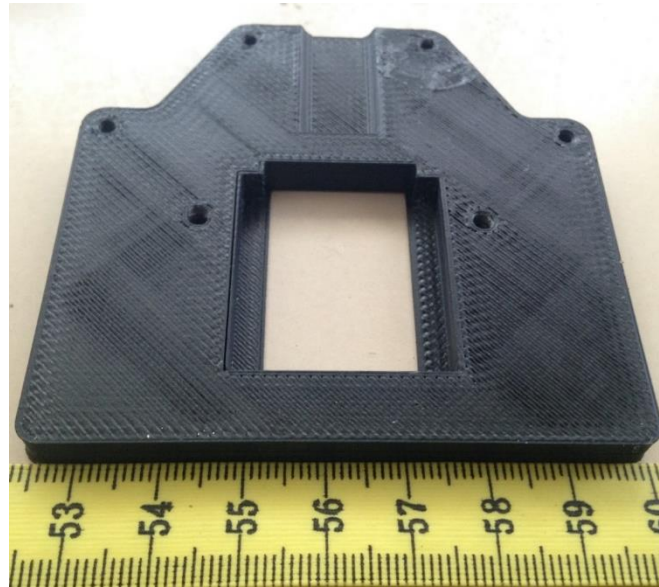
En este caso se ha conservado la disposición del material de soporte ya que al estar pegado a la cama caliente de la impresora se despegaba más fácilmente de la pieza.



*Figura 67: Pieza Pinza (2)*

Pieza: Base

Al igual que para la base del primer prototipo se ha aumentado el porcentaje de relleno respecto a las demás piezas del prototipo.

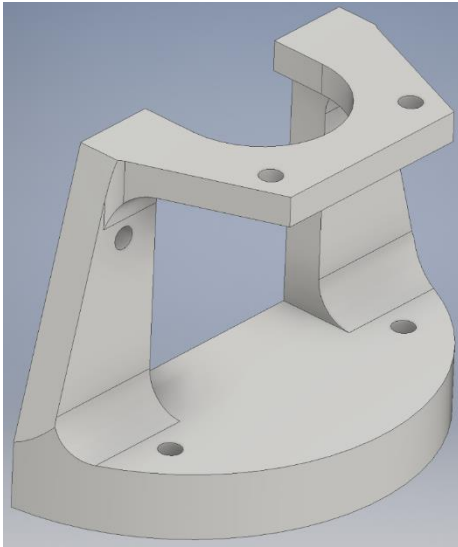


*Figura 68: Pieza Base (2)*

### 3.2. Piezas de anclaje

Una vez montado el segundo prototipo se ha verificado que este cumple con las especificaciones y, por tanto, ha sido determinado como prototipo final y a continuación se pasará a diseñar tanto las piezas para anclarlo al portaherramientas como el sistema de seguridad.

#### 3.2.1. Diseño



*Figura 69: Modelo Pieza Sujetamotor*

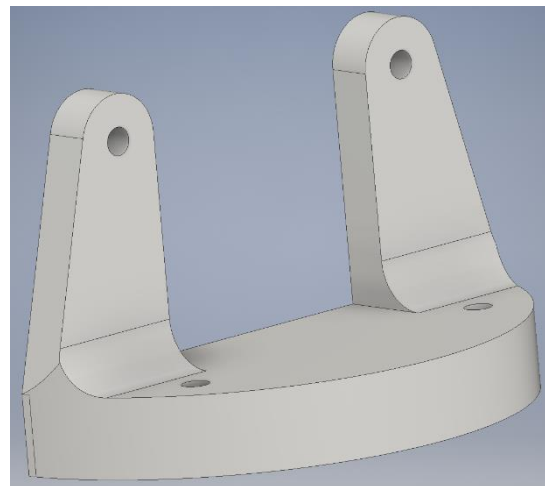
#### Pieza: Sujetamotor

Aunque se ha comprobado que el motor queda bien encajado en la pieza base, se ha querido aprovechar esta pieza, que anclará la pinza al portaherramientas para asegurar el motor mediante las roscas de las que dispone este en las esquinas de la cara superior, para lo cual se han colocado los agujeros de la parte superior.

Tanto esta pieza como la siguiente han sido diseñadas para que estando ancladas a la pinza formen una base circular del tamaño del portaherramientas para que haya la máxima superficie de apoyo.

#### Pieza: Sujetapinza

Dado que esta pieza que sujetará la pinza al portaherramientas va en la parte de atrás de la pinza no se puede aprovechar de la misma forma que la pieza anterior, por tanto únicamente servirá para sujetar la pinza al portaherramientas y por ello la forma circular de su base.



*Figura 70: Modelo Pieza Sujetapinza*

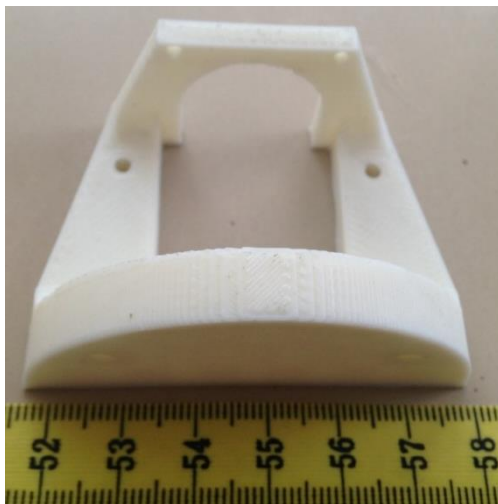
### 3.2.2. Impresión

Una vez más se adjuntan la tabla con los principales datos de impresión de las piezas.

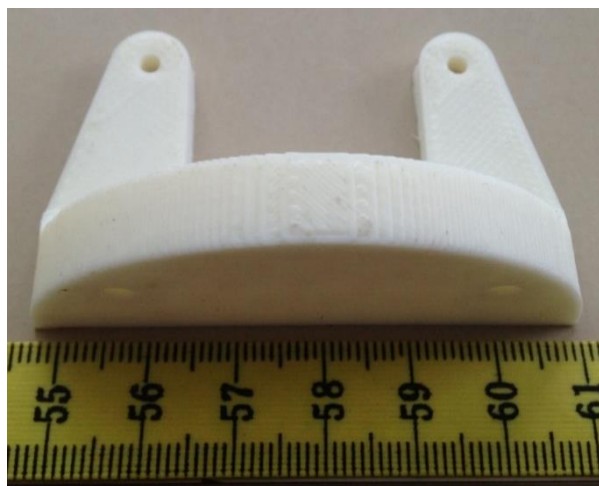
Nombre	Relleno	Material de soporte	Temperatura de impresión	Color	Nº de piezas	Longitud de filamento	Tiempo de impresión
Sujetamotor	0,25	NO	235	Blanco	1	1574 mm	53m 45s
Sujetapinza	0,20	NO	235	Blanco	1	1196 mm	45m 26s

*Tabla 10: Impresión piezas de anclaje*

Dado que la pieza Sujetamotor tendrá que soportar un mayor esfuerzo por la sujeción del motor y el anclaje al portaherramientas se le ha dado un mayor porcentaje de relleno.



*Figura 72: Pieza Sujetamotor*



*Figura 71: Pieza Sujetapinza*

### 3.3. Sistema de seguridad

Dado que este efector va a trabajar en contacto con pacientes debido al tipo de proyecto para el que ha sido desarrollado es necesario el diseño de algún tipo de seguridad que impida que la pinza dañe al paciente por la característica del diseño escogido (permite el movimiento solo en la dirección del motor y no al contrario) gracias a las propiedades geométricas del tornillos sinfín.

#### 3.3.1. Diseño

Finalmente se ha decidido dividir la pieza que transmite el movimiento a la punta de la pinza (pieza Lado-engranaje) en dos partes y unir las gracias a imanes de neodimio con forma de disco, concretamente de 8 mm de diámetro y 3 mm de grosor. De esta forma en caso de que uno de los pacientes fuera pillado por la pinza, podría tirar de uno o ambos lados de esta y las piezas se desacoplarían impidiendo la transmisión de fuerza del motor al extremo de la pinza.

Como se puede apreciar el grosor de las piezas ha permitido que sean dos los imanes que caben dentro de la misma y, gracias a esto, tener una fuerza que une estas dos piezas, suficiente para que al transmitir el motor el movimiento a la pinza estas no se desacoplen.

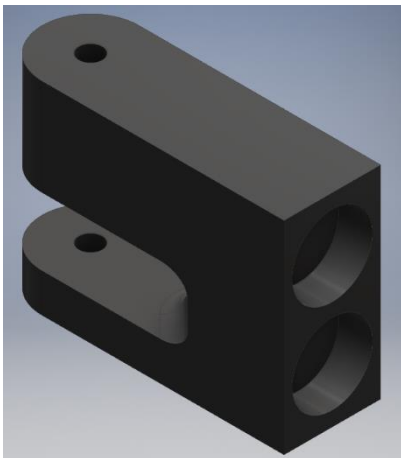


Figura 74: Modelo Pieza Lado-Imán

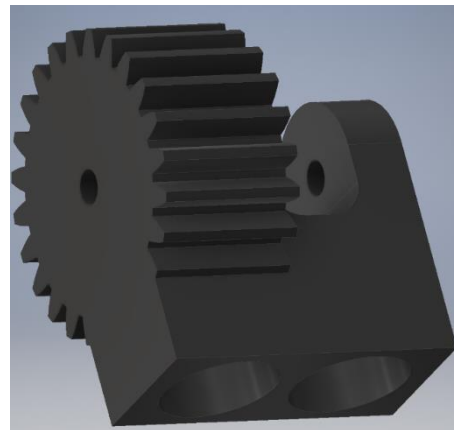


Figura 73: Modelo Pieza Engranaje-Imán

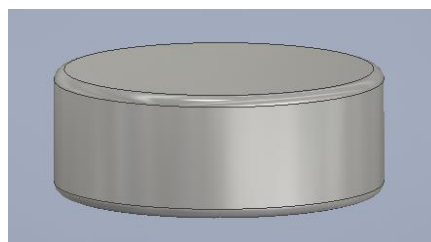
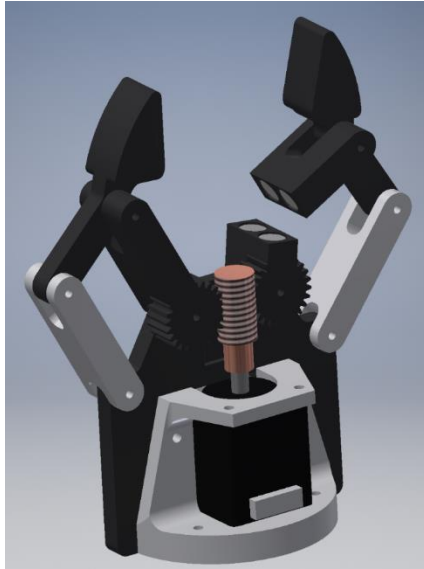
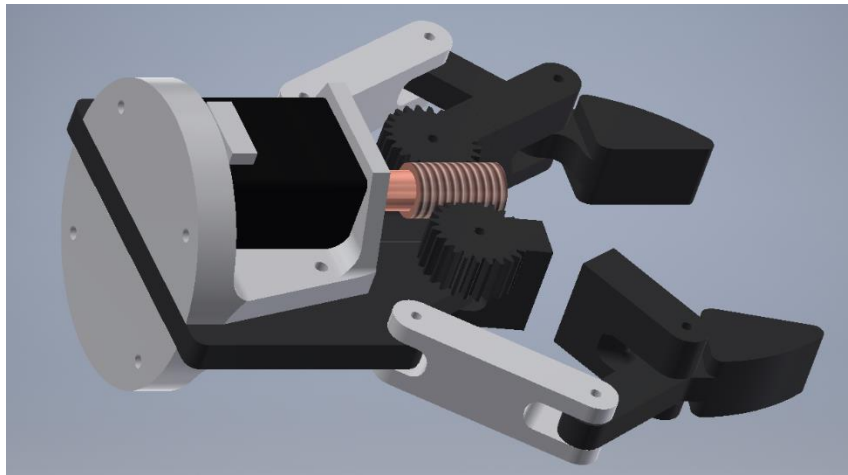


Figura 75: Modelo Imán



*Figura 76: Modelo Pinza Final (a)*



*Figura 77: Modelo Pinza Final (b)*



### 3.3.2. Impresión

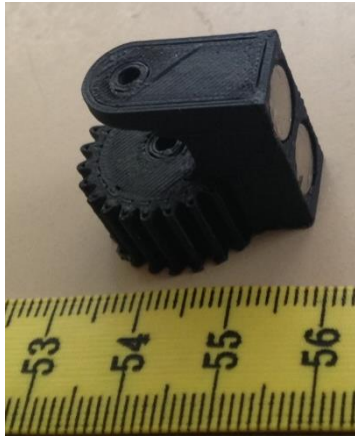


Figura 79: Pieza Engranaje-Imán

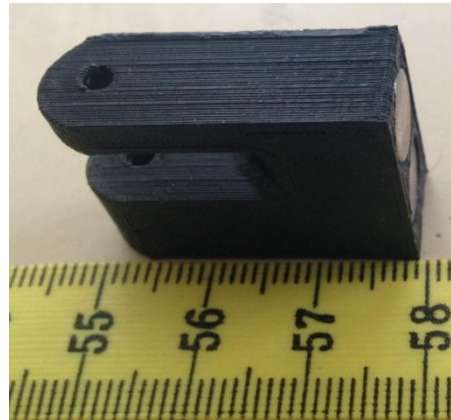


Figura 78: Pieza Lado-Imán

La pieza de la figura 77 se ha impreso con material de soporte en forma de pilar mientras que la pieza de la figura 78 se ha impreso de forma que no necesite material de soporte.

Nombre	Relleno	Material de soporte	Temperatura de impresión	Color	Nº de piezas	Longitud de filamento	Tiempo de impresión
Engranaje-imán	0,20	NO	225	Negro	2	593 mm	35m 9s
Lado-imán	0,20	NO	225	Negro	2	415 mm	17m 40s

Tabla 11: Impresión Piezas de Seguridad

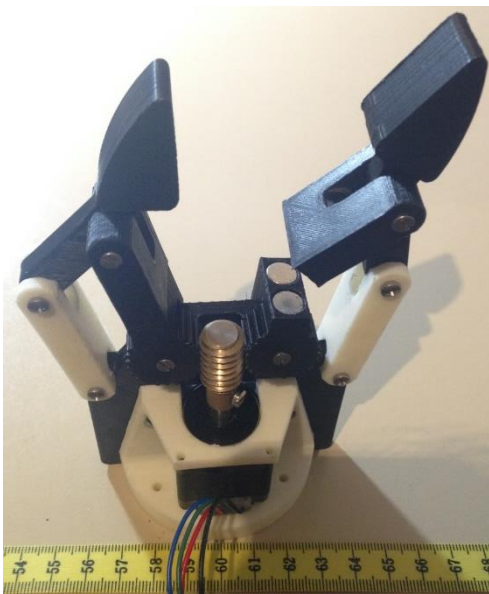


Figura 81: Pinza Final



Figura 80: Pinza Final abierta





*(a): Vista 1 de Pinza acoplada*



*(b): Vista 2 de Pinza acoplada*

*Figura 82: Pinza acoplada en Asibot*

### 3.4. Control

Una vez implementado el prototipo final, se ha procedido a programar un código de control para validar el correcto funcionamiento de la herramienta. Se ha utilizado la plataforma de código abierto ARDUINO, contando con los siguientes recursos hardware:

- Arduino Mega 2560 (Propiedad del autor del trabajo)
- Pulsadores x4
- Resistencias (10k  $\Omega$ ) x4
- Condensador (100  $\mu$ F) x1
- Pololu (Driver del stepper)

#### 3.4.1. Circuito

En este apartado se explicará el funcionamiento del circuito, la función de los componentes y cada uno de los pines del arduino con los que tienen conexión (figura 84).

**Pulsadores:** Una de las patillas de cada uno se conecta a 5V, mientras la otra permanece conectada tanto a un Pin digital del arduino en modo Read, como a Tierra mediante una resistencia de 10k $\Omega$  (para garantizar la lectura LOW por parte del arduino mientras el pulsador esté abierto). A continuación se explicará que activa cada uno de ellos

1.- Botón de cerrar pinza (conectado a Pin 2). En el momento en que se pulse este botón y mientras no esté activado el botón de “fin de carrera abierto”, la pinza hará el movimiento de cierre hasta que se active el pulsador de fin de carrera que indica que la pinza está cerrada.

2.- Botón de abrir pinza (conectado a Pin 3). En el momento en que se pulse este botón y mientras no esté activado el botón de “fin de carrera abierto”, la pinza hará el movimiento de apertura hasta que se active el pulsador de fin de carrera que indica que la pinza está abierta.

3.- Botón de Fin de carrera abierto (conectado a Pin 4). En el momento en que se pulse este botón y mientras la pinza se encuentre en movimiento de apertura, este movimiento se detendrá.

4.- Botón de Fin de carrera cerrado (conectado a Pin 5). En el momento en que se pulse este botón y mientras la pinza se encuentre en movimiento de cierre, este movimiento se detendrá.

**Pololu:** Este componente proporciona tanto la alimentación como las salidas necesarias para controlar el motor paso a paso en base a sus entradas, las cuales son controladas por el arduino.

A continuación se explican los pines que se utilizan en este trabajo.



Figura 83: Conexiones de Pololu A4988

**STEP (Pin 11 del arduino):** En este pin de entrada, por cada flanco de subida el pololu generará las salidas necesarias para avanzar un paso del motor en la dirección que se indique a la entrada DIR.

**DIR (Pin 9 del arduino):** Según la señal de este pin sea HIGH o LOW el motor se moverá en una dirección.

**ENABLE (Pin 10 del arduino):** Mientras a este pin le llegue una señal HIGH el motor permanecerá desactivado.

**1A, 1B, 2A, 2B (conectadas al motor):** Estas salidas son producidas por el pololu para mover el motor según las instrucciones proporcionadas a las entradas.

**VMOT:** Esta entrada debe estar conectada a una fuente de 8V ya que es el pin que proporcionará la alimentación al motor.

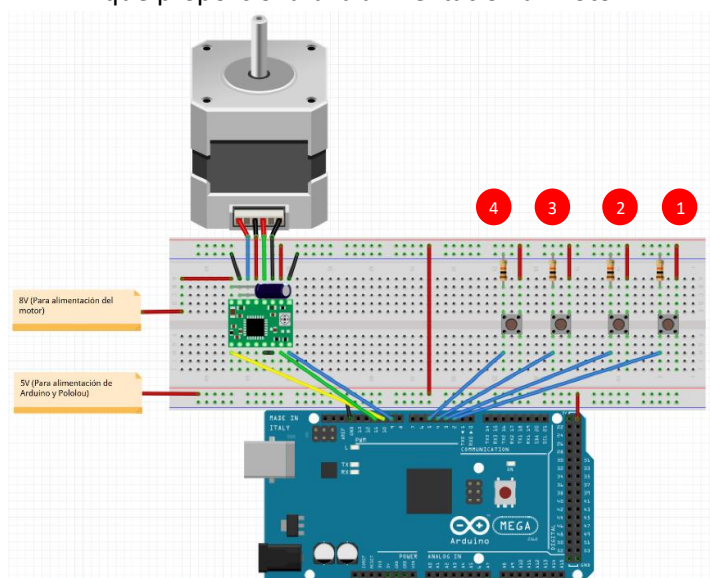


Figura 84: Esquema circuito prototipado

**VDD:** Este pin debe estar conectado a 5V ya que es la propia alimentación del pololu.

Además el circuito cuenta con un condensador electrolítico de 100  $\mu$ F (conectado entre 8V y Tierra) para proteger el pololu de picos de corriente [23].

Por último, el código necesario para que el arduino realice las acciones que se han explicado en este apartado se adjunta en el Anexo I de este trabajo.

## 4. PRESUPUESTO

Teniendo en cuenta que el programa repetier nos proporciona la longitud de hilo usado por pieza, se calculará un valor con las unidades de €/mm para utilizarlo posteriormente de forma rápida.

$$1,05 \frac{g}{cm^3} * \frac{1 Kg}{1000g} * \frac{1 cm^3}{1000 mm^3} = 1,05 * 10^{-6} Kg/mm^3 \quad [24]$$

$$22,99 \frac{€}{Bobina} * \frac{1 Bobina}{1 Kg ABS} * \frac{1,05 * 10^{-6} Kg}{1 mm^3} = 2,41 * 10^{-5} €/mm^3 \quad [26]$$

$$Area \text{ de filamento} = \pi r^2 = \pi * 1,5^2 = 7,07 mm^2$$

Radio	1,5 mm
Densidad	1,05E-06 Kg/mm <sup>2</sup>
Precio por mm <sup>3</sup>	2,41E-05 €/mm <sup>3</sup>
Área del filamento	7,0685835 mm <sup>2</sup>

Tabla 12: Datos para cálculo de precios

#### 4.1. Primer prototipo

PRIMER PROTOTIPO				
Piezas	Longitud	Nº Piezas	€/Pieza	Coste
Lado	1366 mm	2	0,232702009	0,465404018 €
Lado-engranaje	2899 mm	2	0,493852946	0,987705892 €
Pinza	1486 mm	2	0,253144352	0,506288705 €
Base	3307 mm	1	0,563356913	0,563356913 €
			TOTAL	2,522755528 €
				2,52 €

Tabla 13: Presupuesto de piezas de primer prototipo

## 4.2. Segundo prototipo

IMPLEMENTACION FINAL					
Piezas	Longitud	Nº Piezas	€/Pieza	Coste	
Lado	458 mm	2	0,078021611	0,156043221 €	
Lado-engranaje	1070 mm	2	0,182277562	0,364555124 €	
Pinza	597 mm	2	0,101700658	0,203401317 €	
Base	1925 mm	1	0,327929259	0,327929259 €	
			TOTAL	1,051928921 €	
				1,05 €	
Piezas	Longitud	Nº Piezas	€/Pieza	Coste	
Sujetamotor	1574 mm	1	0,268135404	0,268135404 €	
Sujetapinza	1196 mm	1	0,203742023	0,203742023 €	
			TOTAL	0,471877427 €	
				0,47 €	
Piezas	Longitud	Nº Piezas	€/Pieza	Coste	
Engranaje-imán	1574 mm	2	0,268135404	0,536270808 €	
Lado-imán	1196 mm	2	0,203742023	0,407484045 €	
Imanes		8	0,35	2,8 €	
			TOTAL	3,743754853 €	
				3,74 €	
				TOTAL	5,27 €

Tabla 14: Presupuesto piezas Implementación final

## 4.3. Control

CONTROL				
Piezas	Nº Piezas	€/Pieza	Coste	
Pulsador*	4	0,020666667	0,082666667 €	
Resistencias*	4	0,0057	0,0228 €	
Condensador*	1	0,05288	0,05288 €	
Pololu**	1	7,11	7,11 €	
Motor**	1	58,78	58,78 €	
Tornillo Sin fin**	1	12	12 €	
		TOTAL	78,04834667 €	78,05 €

Tabla 15: Presupuesto Control

\*Comprado en lote grande

\*\*Precio aproximado, ya disponibles en el laboratorio.

#### 4.4. Personal

Nombre	Tipo de personal	Coste/mes	Dedicación	Coste total
Emilio Aguilera Nuñez	Ingeniero en Prácticas	1000 €	3 meses	3000 €

*Tabla 16: Coste de personal*

## 5. CONCLUSIÓN



### 5.1. Análisis de resultados

Al final de este trabajo se ha conseguido implementar una pinza utilizando tecnología de prototipado rápido.

Teniendo en cuenta el presupuesto anterior y los precios de pinzas comerciales, se puede afirmar que se ha conseguido con éxito el objetivo principal del proyecto en lo que se refiere a la fabricación low-cost de la pinza.

Además, la herramienta es accionada por un solo actuador con una fuerza efectiva de 1,5 N, e incluye un sistema de apertura de seguridad implementado por imanes

Aunque cabe destacar que, con respecto al control, no ha sido posible una implementación completa de la pinza, teniendo en cuenta que debería contar con las conexiones de la figura 7 para poder realizar una conexión automática. Esto es debido a los cambios que se están realizando en estas conexiones y los conos que las alojan como se explica en el punto 1.1.2.

Además del objetivo principal, en el proceso que se ha seguido para la realización de este trabajo se han realizado con éxito otras tareas tales como:

- Investigación y estudio de las posibilidades en el ámbito de este trabajo.
- Localización de una necesidad concreta dentro de un proyecto ya iniciado.
- Diseño de un primer prototipo funcional desechado por el tamaño del mismo, determinando así una nueva característica para el siguiente prototipo.
- Diseño de un segundo prototipo y verificación de que sus características cumplan las especificaciones requeridas.
- Diseño de un método de seguridad mediante el desacople de las piezas del prototipo debido a que este va a tratar con personas.
- Diseño del control para movimiento del prototipo.

## **5.2. Trabajos futuros**

Dado que este trabajo forma parte del proyecto robohealth, tras la finalización de este, se seguirán realizando cambios que sigan mejorando o añadiendo funcionalidad a la pinza.

En el momento en el que se ha redactado este trabajo se ha determinado que algunas de las posibles mejoras que pueden aportar funcionalidad son:

- Terminar la implementación del control de la pinza, como ya se ha dicho en la conclusión, esta es una tarea necesaria en el momento en el que se terminen los cambios en los conos de conexión.
- Diseño e impresión de fundas para la punta de la pinza, que gracias al material ninjaflex aumentará el rozamiento del punto de agarre y mejorará el agarre de objetos.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Robohealth, <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/project/robohealth>  
(Visitado el 23/09/16)
- [2] Robot AMOR, <http://www.amorrobot.com/overview.shtml>  
(Visitado el 23/09/16)
- [3] A. Jardón Huete, "*Assistive robot design methodology. Application to portable robot ASIBOT*", Universidad Carlos III, Tesis Doctoral 2016.
- [4] Jian Jin, Wenzeng Zhang, Zhenguo Sun, Qiang Chen, "*LISA Hand: Indirect Self-Adaptive Robotic Hand for Robust Grasping and Simplicity*", International Conference on Robotics and Biomimetics December 11-14, 2012, Guangzhou, China.
- [5] Raafat Mahmoud, Atsushi Ueno, Shoji Tatsumi, "*Dexterous Mechanism Design for an Anthropomorphic Artificial Hand: Osaka City University Hand I*", International Conference on Humanoid Robots Nashville, TN, USA, December 6-8, 2010.
- [6] Jun Ueda, Yutaka Ishida, Masahiro Kondo, Tsukasa Ogasawara, "*Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor*", International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April 2005.
- [7] Guozhi Li, Cong Fu, Fuhai Zhang and Shuguo Wang, "*A Reconfigurable Three-Finger Robotic Gripper*", International Conference on Information and Automation Lijiang, China, August 2015.
- [8] Kuat Telegenov, Yedige Tlegenov, And Almas Shintemirov. "*A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed Three-Finger Gripper*", Platform for Research and Educational Purposes, May 15, 2015.
- [9] A. M. Dollar, R. D. Howe, "*The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation*", International Journal of Robotics Research, 2010.
- [10] L.U. Odhner, R.R. Ma, and A.M. Dollar, "*Open-Loop Precision Grasping with Underactuated Hands Inspired by a Human Manipulation Strategy*", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013.
- [11] L.U. Odhner, L.P. Jentoft, M.R. Claffee, N. Corson, Y. Tenzer, R.R. Ma, M. Buehler, R. Kohout, R.D. Howe, and A.M. Dollar, "*A Compliant, Underactuated Hand for Robust Manipulation*", International Journal of Robotics Research, 2014.

- [12] R.R. Ma, A. Spiers, and A.M. Dollar, "M2 Gripper: Extending the Dexterity of a Simple, Underactuated Gripper", Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robotics (ReMAR).
- [13] Shadow Dexterous Hand, <https://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>  
(Visitado el 23/09/16)
- [14] Shadow Lite, <https://www.shadowrobot.com/hand-lite/>  
(Visitado el 23/09/16)
- [15] SVH Hand, <http://mobile.schunk-microsite.com/en/produkte/products/servo-electric-5-finger-gripping-hand-svh.html>  
(Visitado el 23/09/16)
- [16] Barret Hand, <http://www.barrett.com/products-hand.htm>  
(Visitado el 23/09/16)
- [17] Robotiq 3-Finger Gripper, <http://robotiq.com/products/industrial-robot-hand/>  
(Visitado el 23/09/16)
- [18] Robotiq 2-Finger Gripper, <http://robotiq.com/products/adaptive-robot-gripper/>  
(Visitado el 23/09/16)
- [19] R. Wood, C. Walsh, Smaller, softer, safer, smarter robots, (2013).
- [20] HAO Yufei, GONG Zheyuan, XIE Zhexin, GUAN Shaoya, YANG Xingbang, REN Ziyu, WANG Tianmiao, WEN Li, "Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length", Proceedings of the 35th Chinese Control Conference July 27-29, 2016
- [21] Working Model, <https://www.addlink.es/productos/software/working-model-2d#caracteristicas>  
(Visitado el 23/09/16)
- [22] Autocad, [http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-04-25\\_01-17-11120379.pdf](http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-04-25_01-17-11120379.pdf)  
(Visitado el 23/09/16)
- [23] Pololu, <https://www.pololu.com/product/1182>

(Visitado el 23/09/16)

- [24] Propiedades ABS, <http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>

(Visitado el 23/09/16)

- [25] Habib S. Benabdallah, "*Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions*", Tribology International 40 (2007).

- [26] ABS utilizado, <https://kitprinter3d.com/es/filamento-3d/98-filamento-premium.html#/diametro-del-filamento-3-mm/tipo-de-plastico-premium-abs/color-filament-black-darkside>.

(Visitado el 23/09/16)

## 7. ANEXO I (Código Arduino)

```

#include <PWM.h>

const int steps = 11;          //
const int direccion = 9;      //
const int enable = 10;        // Definición de los pines a utilizar
const int abrir = 3;          //
const int cerrar = 2;         //
const int fincarrera1 = 4;    //
const int fincarrera2 = 5;    //

int ciclo = 127;

int32_t Vnormal = 600; // frecuencia (in Hz)
int32_t Vrapida = 800; // frecuencia (in Hz)      Frecuencias a las de trabajo del PWM
int32_t Vminima = 300; // frecuencia (in Hz)

void setup() {

  pinMode (abrir,INPUT);

  pinMode (cerrar, INPUT);

  pinMode(steps, OUTPUT);

  pinMode(direccion, OUTPUT);

  pinMode(enable, OUTPUT);

  pinMode (fincarrera1,INPUT);

  pinMode (fincarrera2, INPUT);

```



```

InitTimersSafe(); // Fundamental para que funcione el comando pwmWrite.

SetPinFrequencySafe(steps, Vnormal); //Determina la frecuencia de trabajo del pin steps.

pwmWrite(steps, ciclo); //Activa el pin Steps con la frecuencia determinada anteriormente.

}

void loop() {

    digitalWrite (reset,HIGH); // Desactiva el motor desde el pololu

    while (digitalRead(abrir) == HIGH){

        while (digitalRead(fincarrera1) == LOW){

            digitalWrite (direccion, HIGH);

            digitalWrite (enable,LOW);

        }

    }

    while (digitalRead(cerrar) == HIGH){

        while (digitalRead(fincarrera2) == LOW){

            digitalWrite (direccion, LOW);

            digitalWrite (enable,LOW);

        }

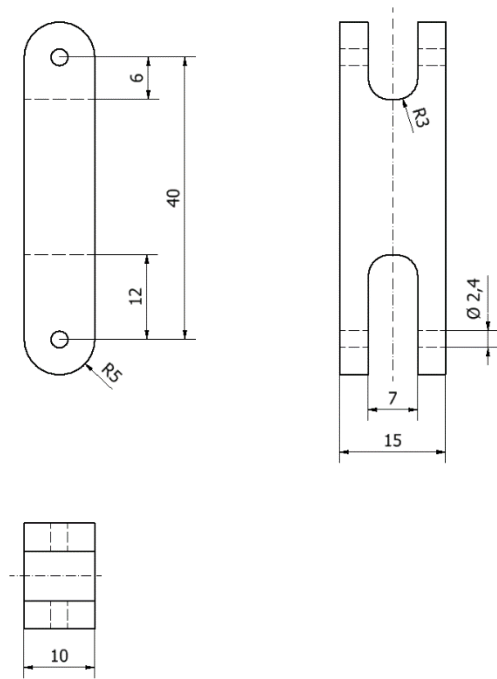
    }

}

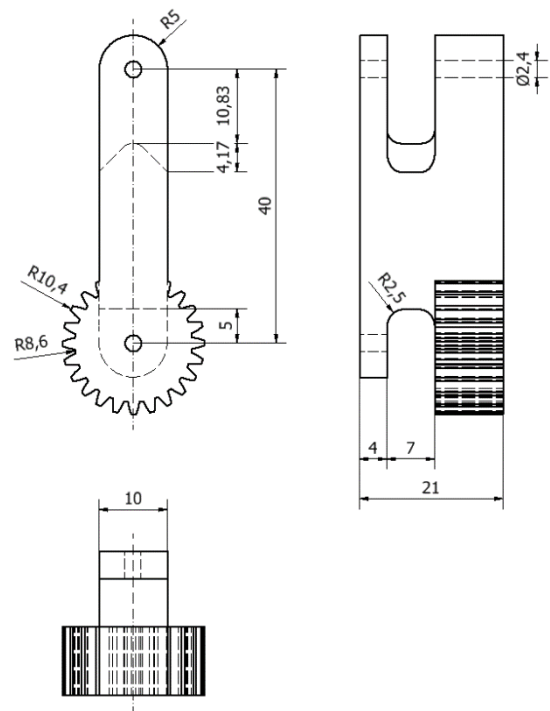
```

## 8. ANEXO I (Planos)

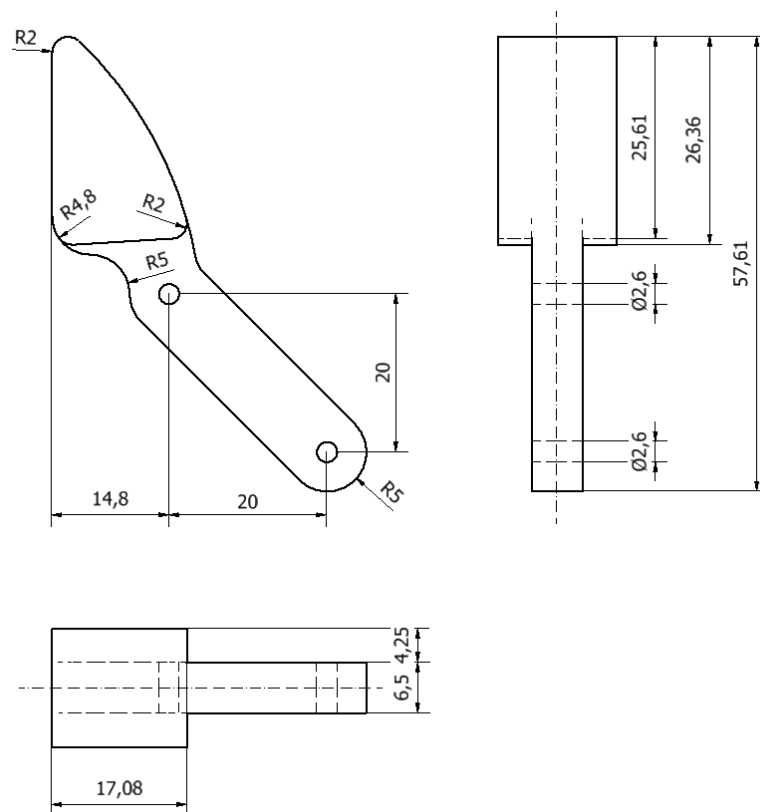
Pieza: Lado



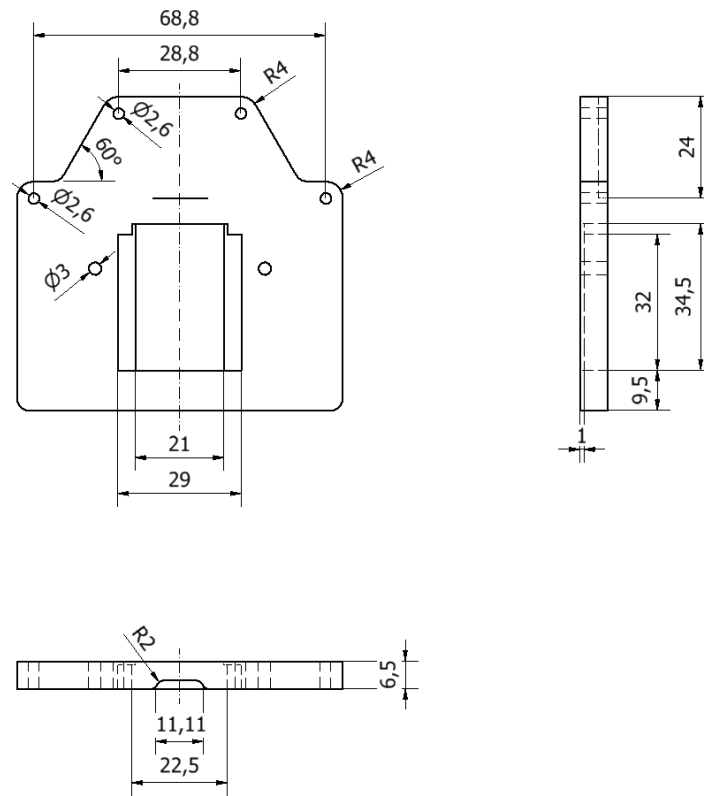
Pieza: Lado-engranaje



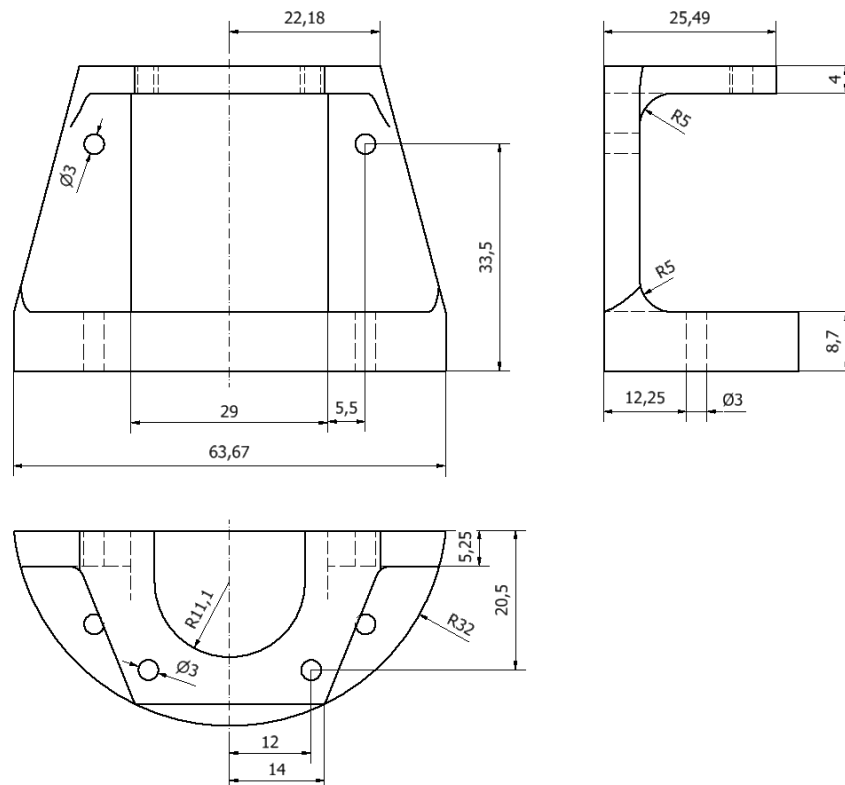
Pieza: Pinza



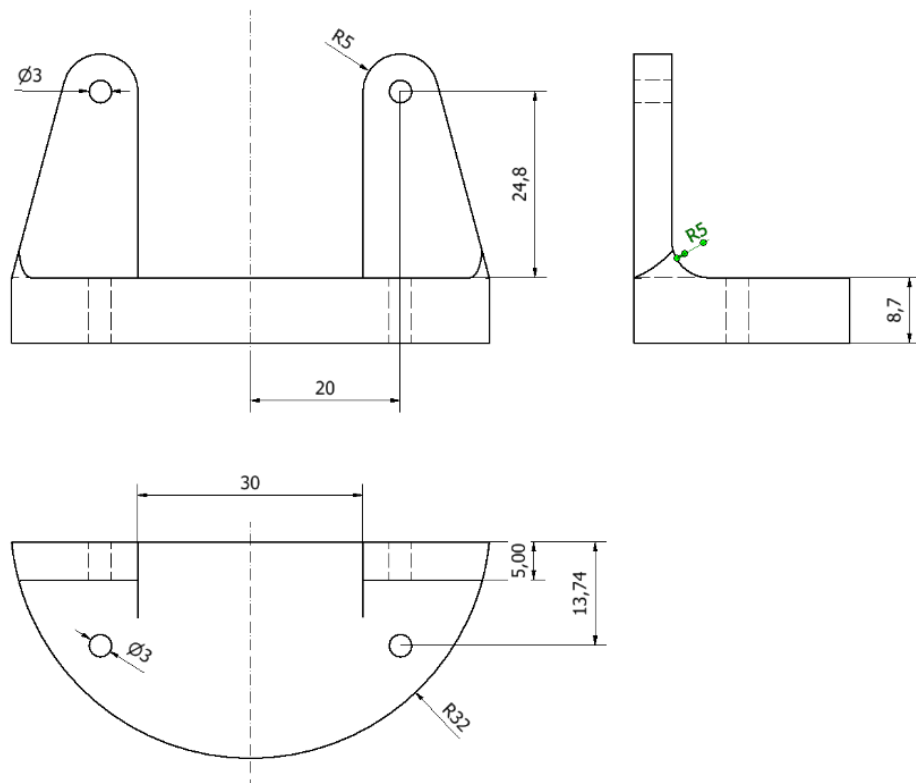
Pieza: Base



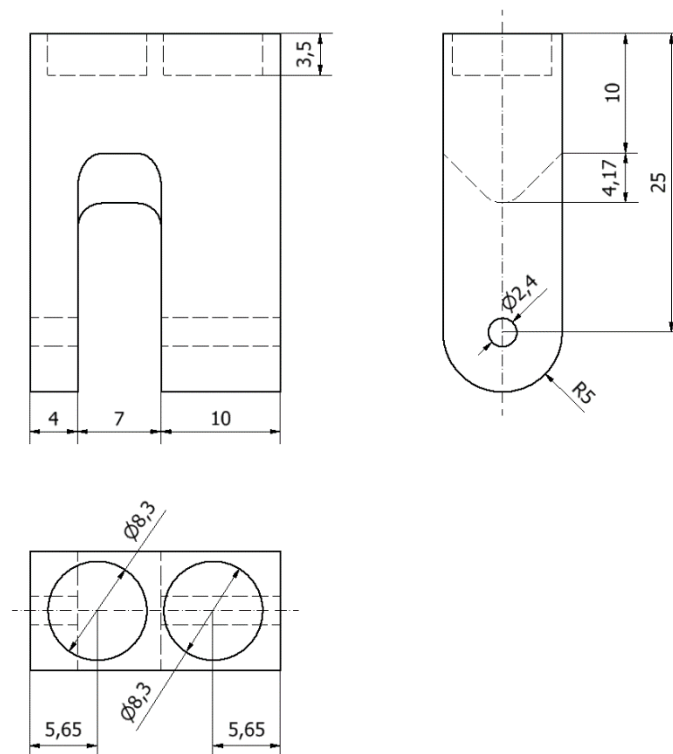
Pieza: Sujetamotor



Pieza: Sujetapinza



Pieza: Lado-imán



Pieza: Engranaje-Imán

